

L'énergie durable — Pas que du vent !

Version 3.5.2_FR. 1^{er} octobre 2011.

Cette couverture ne doit pas apparaître dans le livre imprimé.

Édition basse résolution

L'énergie durable — Pas que du vent !

L'énergie durable — Pas que du vent !

David JC MacKay

UIT
CAMBRIDGE, ROYAUME-UNI

Publié pour la première fois au Royaume-Uni en
2009.

UIT Cambridge Ltd.
PO Box 145
Cambridge
CB4 1GQ
United Kingdom / Royaume-Uni

Tél : +44 1223 302 041
Web : www.uit.co.uk

Copyright © 2009 David JC MacKay
Tous droits réservés.

ISBN 978-0-9544529-3-3 (poche)
ISBN 978-1-906860-01-1 (relié)

The right of David JC MacKay to be identified as
the auteur of this work has been asserted by him
in accordance with the Copyright, Designs and
Patents Act 1988.

While this publication intends to provide
accurate and authoritative information in regard
to the subject matter covered, neither the
publisher nor the author makes any
representation, express or implied, with regard
to the accuracy of information contained in this
book, nor do they accept any legal responsibility
or liability for any errors or omissions that may
be made. This work is supplied with the
understanding that UIT Cambridge Ltd and its
authors are supplying information, but are not
attempting to render engineering or other
professional services. If such services are
required, the assistance of an appropriate
professional should be sought.

Many of the designations used by manufacturers
and sellers to distinguish their products are
claimed as trade-marks. UIT Cambridge Ltd
acknowledges trademarks as the property of
their respective owners.

10 9 8 7 6 5 4 3 2 1

3.5.2_FR

à tous ceux qui ne pourront pas profiter
des réserves d'énergie accumulées
pendant deux milliards d'années

Préface

De quoi parle ce livre ?

Mon souhait est de pouvoir réduire les émissions d'âneries — les âneries au sujet de l'énergie durable. Tout le monde dit que se libérer des combustibles fossiles est important, et on nous encourage tous à « faire la différence », mais en fait, la plupart des choses qui sont supposées faire la différence ne riment à rien.

Les émissions d'âneries sont élevées en ce moment, parce que les gens se mettent à réagir de manière émotionnelle (par exemple au sujet des champs d'éoliennes ou du nucléaire) et que personne ne parle des chiffres. Ou bien ceux qui en parlent se débrouillent pour donner de gros chiffres, histoire d'impressionner tout le monde et de marquer des points dans le débat, plutôt que de faire avancer la discussion de fond.

Ce livre a pour but d'être franc au sujet des chiffres. Il a pour but d'aider le lecteur à faire le tri parmi tout le baratin entendu ici et là, et à choisir les actes qui font vraiment la différence et les politiques à la hauteur.

Ce livre est libre

Je n'ai pas écrit ce livre pour faire de l'argent. Je l'ai écrit parce que l'énergie durable, c'est important. Si vous voulez disposer librement du livre pour votre usage personnel, ne vous gênez pas : vous le trouverez sur Internet à l'adresse www.withouthotair.com.

Ce livre est libre dans un second sens : à l'exception des dessins et des photographies dont l'auteur est nommément précisé, vous êtes même libre d'utiliser *tout* le contenu de ce livre, qui relève de la licence *Creative Commons Attribution-Non-Commercial-Share-Alike 2.0 UK : England & Wales*. (Les dessins et les photographies en sont exclues parce que leurs auteurs m'ont généralement autorisé à les inclure dans mon travail, mais *pas* à les partager sous la licence *Creative Commons*.) En particulier, l'usage du contenu de ce livre sera tout particulièrement apprécié dans un cadre éducatif. Vous trouverez également sur mon site Web une version haute-résolution de chacune des figures de ce livre.

Comment ce livre est-il écrit ?

Certains chapitres commencent par une citation. Mais ne croyez pas que je sois toujours d'accord avec le contenu de ces citations. Voyez-les plutôt comme des provocations ou des hypothèses à lire avec un œil critique.

A la plupart des premiers chapitres (numérotés 1, 2, 3, ...) correspond un chapitre technique plus long (A, B, C, ...). Ces chapitres techniques se situent après la page 300.

A la fin de chaque chapitre se trouvent des notes et des liens supplémentaires vers d'autres sources et références. Vous ne trouverez pas de notes de bas de page dans ce livre, parce que je trouve qu'elles perturbent la lecture et parasitent le texte principal de la page. Si vous aimez les notes de bas de page, vous pouvez utilement en ajouter — à presque chaque affirmation importante du livre, il y a une note correspondante en fin de chapitre qui donne des sources ou des précisions supplémentaires.

Le texte contient également des références vers des ressources sur le Web. Lorsqu'un lien hypertexte était monstrueusement long, j'ai utilisé le service TinyURL, et j'ai précisé le tiny code directement dans le texte, comme ceci — [yh8xse] — la référence complète se trouve à la fin du livre, en page 403. [yh8xse] est un raccourci pour une mini-URL, dans le cas présent : <http://tinyurl.com/yh8xse>. La liste complète des URL de ce livre est fournie sur <http://tinyurl.com/yh8xse>.

Les retours et relevés d'erreurs sont les bienvenus. Je suis sûr que ce livre n'est pas exempt de coquilles : par exemple, dans de précédentes versions de travail de ce livre, certains des nombres que je donnais étaient faux d'un facteur deux. Même si j'espère que les erreurs résiduelles ne sont pas aussi grosses que ça, j'envisage de mettre à jour certaines des valeurs que contient ce livre au fur et à mesure que je continuerai à apprendre des choses au sujet de l'énergie durable.

Comment citer ce livre :

David J.C. MacKay. *Sustainable Energy – without the hot air.*

UIT Cambridge, 2008. ISBN 978-0-9544529-3-3. Disponible gratuitement sur le Web à l'adresse www.withouthotair.com.



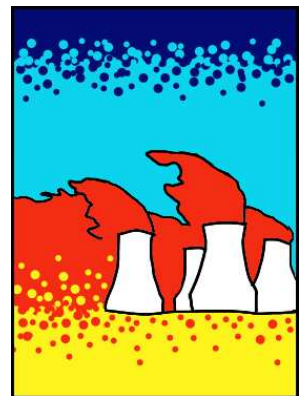
Table des matières

I	Des chiffres, pas des adjectifs	1
1	Motivations	2
2	Le bilan	25
3	Voitures	34
4	Vent	38
5	Avions	42
6	Solaire	45
7	Chauffer et refroidir	59
8	Hydroélectricité	64
9	Lumière	67
10	Vent en mer	70
11	Gadgets	80
12	Vagues	85
13	Alimentation et agriculture	89
14	Marées	95
15	Les trucs	104
16	Géothermie	114
17	Quelques services publics	119
18	Peut-on vivre uniquement sur les renouvelables ?	123
II	Faire la différence	135
19	Chaque GRAND geste compte	136
20	De meilleurs transports	140
21	Un chauffage plus intelligent	167
22	Utiliser l'électricité de manière plus efficace	184
23	Des combustibles fossiles durables ?	186
24	Du nucléaire ?	190
25	Vivre sur les renouvelables d'autres pays ?	209
26	Fluctuations et stockage	220
27	Cinq plans énergétiques pour la Grande-Bretagne	240
28	Remettre les coûts en perspective	253
29	Qu'est-ce qu'on fait maintenant ?	263
30	Programmes énergétiques pour l'Europe, l'Amérique et le monde	274
31	La dernière chose dont il faut parler	284

32	Dire oui	296
	Remerciements	297
III	Chapitres techniques	299
A	Voitures II	300
B	Vent II	311
C	Avions II	318
D	Solaire II	333
E	Chauffage II	341
F	Vagues II	361
G	Marées II	365
H	Les trucs II	378
IV	Données utiles	385
I	Référence rapide	386
J	Populations et superficies	397
K	Historique énergétique au Royaume-Uni	401
	Liste de liens Web	403
	Références	407
	Index	414
	A propos de l’auteur	428

Première partie

Des chiffres, pas des adjectifs



1 Motivations

Nous vivons à une époque où les émotions et les sentiments comptent plus que la vérité, et où la science est largement ignorée.

James Lovelock

Récemment, j'ai lu deux livres, l'un écrit par un physicien, l'autre par un économiste. Dans *Panne sèche*, David Goodstein, physicien au Caltech, décrit une crise énergétique imminente causée par « la fin de l'Ère du pétrole ». Cette crise arrivera bientôt, prédit-il : la crise éclatera, non pas quand la dernière goutte de pétrole aura été extraite, mais quand l'extraction ne pourra plus répondre à la demande — peut-être dès 2015 ou 2025. De plus, même si nous reportons immédiatement par magie toute notre gloutonnerie énergétique vers l'énergie nucléaire, écrit Goodstein, la crise pétrolière serait simplement remplacée par une crise *nucléaire* dans environ vingt ans, lorsque les réserves d'uranium auront été elles aussi épuisées.

Dans *L'écologiste sceptique*, Bjørn Lomborg nous dépeint une situation complètement différente. « Tout va bien ». Et même, « tout s'améliore ». De plus, « nous n'allons pas vers une crise énergétique majeure », et « il y a beaucoup d'énergie ».

Comment deux personnes intelligentes peuvent-elles arriver à des conclusions aussi différentes ? Il fallait que j'aille au fond des choses.

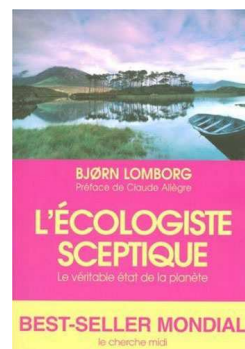
L'énergie s'est invitée dans les journaux britanniques en 2006. Attisé par les annonces d'un grand changement climatique et le triplement du prix du gaz naturel en seulement six ans, le débat a fait rage. Comment l'Angleterre devrait-elle gérer ses besoins en énergie ? Et que faire au niveau mondial ?

« Éolien ou nucléaire ? », par exemple. Difficile d'imaginer plus grande polarisation des vues entre des gens sensés. Lors d'une discussion sur le projet d'expansion de l'énergie nucléaire, Michael Meacher, ancien ministre de l'environnement, a déclaré : « si nous devons réduire les gaz à effet de serre de 60 % [...] d'ici 2050, les énergies renouvelables sont la seule façon de le faire » ; Sir Bernard Ingham, ancien haut fonctionnaire, parlant en faveur de l'expansion nucléaire, a déclaré : « quelqu'un qui pense que les énergies renouvelables peuvent combler le fossé [énergétique] vit dans un monde totalement utopique et est, à mon avis, un ennemi du peuple. »

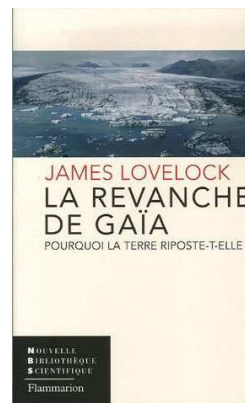
Des divergences comparables se font entendre dans le mouvement écologique. Tous sont d'accord : *quelque chose* doit être fait de manière urgente... mais *quoi* ? Jonathon Porritt, président de la « Commission du Développement Durable », écrit : « un nouveau programme de construction de centrales nucléaires n'a aucune justification à l'heure actuelle, et [...] toute proposition de ce type serait incompatible avec la stratégie de développement de l'énergie durable [du gouvernement] » ; et « une stratégie



Panne sèche : la fin de l'ère du pétrole. David Goodstein (2004).



L'écologiste sceptique. Bjørn Lomborg (2001).



La revanche de Gaïa : pourquoi la Terre riposte-t-elle ? James Lovelock (2006).

non nucléaire pourrait et devrait être suffisante pour fournir toutes les réductions en carbone dont nous avons besoin d'ici 2050 et au-delà, et pour assurer l'accès à des sources d'énergie fiables. »

Par contre, l'écologiste James Lovelock écrit dans son livre, *La revanche de Gaïa* : « Il est maintenant bien trop tard pour mettre en place le développement durable. » Selon lui, l'énergie issue de la fission nucléaire, sans être la panacée à long terme que réclame notre planète épuisée, est « le seul remède efficace que nous ayons maintenant à notre disposition ». Les éoliennes terrestres sont « tout juste un geste destiné à décerner un certificat de crédibilité environnementale [à nos dirigeants]. »

Ce débat enflammé tourne fondamentalement autour des chiffres. Quelle quantité d'énergie chaque ressource peut-elle fournir, à quel prix économique et social, et avec quels risques ? Mais on donne rarement de véritables chiffres. Lors des débats publics, des gens se contentent de dire : « Le nucléaire est un gouffre économique » ou « Nous avons une quantité *énorme* de vent et de vagues ». Le problème avec ce type de langage est qu'il ne suffit pas de savoir que quelque chose est énorme : il nous faut pouvoir comparer cet « énorme » avec un autre « énorme », en l'occurrence *notre énorme consommation d'énergie*. Pour faire cette comparaison, il nous faut des chiffres, pas des adjectifs.

Quand des chiffres sont utilisés, leur signification est souvent obscurcie par leur énormité. Ces chiffres sont choisis pour impressionner, pour marquer des points au cours du débat, plutôt que pour informer. « Chaque jour, les habitants de Los Angeles font 227 millions de kilomètres en voiture — la distance entre la Terre et Mars ». « Chaque année, 11 millions d'hectares de forêts tropicales sont détruits ». « On jette à la mer 6 milliards de kilogrammes de déchets tous les ans ». « Les Britanniques jettent 2,6 milliards de tranches de pain de mie par an ». « Le papier enterré chaque année au Royaume-Uni pourrait remplir 103 448 bus à impériale ». Si toutes les idées inefficaces pour résoudre la crise énergétique étaient mises côte à côte, elles pourraient toucher la Lune... mais je m'égare !

Le résultat de ce manque de chiffres significatifs et de faits établis ? Nous sommes inondés de baratin. La BBC nous abreuve de conseils pour que nous puissions contribuer à sauver la planète — par exemple « débranchez votre chargeur de téléphone portable quand il n'est pas utilisé » ; et si quelqu'un conteste au motif que les chargeurs de téléphone portable ne sont *pas vraiment* notre forme numéro un de consommation d'énergie, on nous assène la formule magique « chaque petit geste compte ». Chaque petit geste compte, vraiment ? Voici une formule un peu plus réaliste :

Si tout le monde en fait un petit peu, nous n'arriverons à faire qu'un petit peu.

Les entreprises nous abreuvent aussi quotidiennement de baratin, en nous racontant à quel point elles sont formidables, ou comment elles peuvent nous aider à « agir concrètement ». Le site web de BP, par exemple,

vante les réductions de pollution en dioxyde de carbone (CO₂) qu'ils espèrent obtenir en changeant la peinture de leurs navires. Mais qui peut se faire avoir par ça ? Certainement tout le monde devine que ce n'est pas la peinture à l'extérieur, mais le truc à l'intérieur du pétrolier qui mérite notre attention, si notre société veut réduire de manière significative ses émissions de CO₂. BP a aussi créé un service d'absolution carbone sur le Web, « targetneutral.com », où l'on prétend pouvoir « neutraliser » toutes vos émissions de carbone, sans que cela ne vous coûte « les yeux de la tête » — et en effet, on vous propose de nettoyer votre pollution en CO₂ pour seulement 50 euros par an. Comment ce compte peut-il être bon ? Si les coûts réels de la solution au changement climatique étaient de 50 euros par personne, le gouvernement pourrait le résoudre simplement avec la petite monnaie qui traîne dans les poches du Ministre des Finances !

Encore plus condamnables sont les entreprises qui exploitent l'intérêt actuel pour l'environnement en proposant « des piles à eau », « des téléphones portables biodégradables », « des éoliennes portatives à monter soi-même » et autres gadgets bidons et inutiles.

Les militants savent aussi tromper leur monde. Ceux qui veulent promouvoir les énergies durables au lieu du nucléaire, par exemple, déclarent « des éoliennes en mer pourraient alimenter tous les foyers britanniques » ; ensuite ils nous disent que « de nouvelles centrales nucléaires seraient de peu d'utilité pour lutter contre le changement climatique » parce que 10 nouvelles centrales nucléaires « ne réduiraient les émissions que d'environ 4 % ». Cette argumentation est trompeuse parce que le champ d'application est changé en cours de route, en passant du « nombre de maisons alimentées » à la « réduction des émissions ». La vérité, c'est que la quantité d'énergie électrique générée par ces superbes éoliennes qui « peuvent alimenter tous les foyers du Royaume-Uni », c'est exactement la même que celle produite par les 10 centrales nucléaires ! « Alimenter tous les foyers » correspond à seulement 4 % des émissions du Royaume-Uni.

Mais au royaume du baratin, les plus condamnables sont peut-être encore ceux qui devraient vraiment être mieux informés — les éditeurs des média qui propagent le baratin — par exemple, le *New Scientist* avec son article sur « la voiture propulsée à l'eau ».*

Dans un climat dans lequel les gens ne comprennent pas les chiffres, les journaux, les militants, les entreprises et les politiques peuvent tout se permettre.

Nous avons besoin de chiffres simples, faciles à comprendre, à comparer et à retenir.

Avec les bons chiffres en tête, nous serons mieux à même de répondre à des questions comme celles-ci :

1. Est-il envisageable qu'un pays comme le Royaume-Uni puisse vivre en se reposant uniquement sur ses sources d'énergie renouvelable ?
2. Si tout le monde tourne son thermostat d'un degré pour se rapprocher de la température extérieure, si tout le monde conduit une voi-

*Se référer aux notes de fin de ce chapitre (page 21) pour les détails sordides. (À la fin de chaque chapitre, je donne des arguments plus détaillés des idées du chapitre, les sources des données et citations, et des références vers des informations complémentaires. Pour éviter de distraire le lecteur, il n'y aura plus d'autre note de bas de page dans ce livre.)

ture plus petite, et si tout le monde débranche son chargeur de téléphone portable inutilisé, évitera-t-on une crise énergétique ?

3. Faudrait-il augmenter de façon significative les taxes sur les carburants des véhicules ? Faudrait-il diviser par deux la vitesse limite autorisée ?
4. Quelqu'un qui préconise l'utilisation d'éoliennes au lieu de centrales nucléaires est-t-il « un ennemi du peuple » ?
5. Si le changement climatique est « une menace plus grande que le terrorisme », le gouvernement devrait-il criminaliser « la glorification des voyages » et faire adopter des lois contre « l'exhortation à la consommation » ?
6. Une transition vers des « technologies avancées » nous permettra-t-elle d'éliminer la pollution au dioxyde de carbone sans avoir à changer notre mode de vie ?
7. Faut-il encourager les gens à manger végétarien ?
8. La population de la Terre est-elle six fois trop nombreuse ?

Pourquoi discuter de la politique énergétique ?

Trois motivations différentes alimentent aujourd'hui les débats sur l'énergie.

Premièrement, les combustibles fossiles sont une ressource limitée. Il semble possible que le pétrole bon marché (qui fait avancer nos voitures et nos camions) et le gaz naturel bon marché (avec lequel nous chauffons beaucoup de nos immeubles) seront épuisés de notre vivant. Nous cherchons donc des sources d'énergie alternatives. En effet, puisque les combustibles fossiles sont une ressource de valeur, qu'ils servent à fabriquer des plastiques et bien d'autres choses créatives encore, peut-être devrions-nous les conserver pour en faire un meilleur usage que simplement de les brûler.

Deuxièmement, la sécurité de notre approvisionnement énergétique est un sujet qui nous concerne. Même si du pétrole est disponible quelque part dans le monde, peut-être souhaitons-nous ne pas en dépendre si cela devait rendre notre économie vulnérable aux caprices de pays étrangers peu fiables. (J'espère que vous aurez remarqué la trace de sarcasme dans mes propos). Si l'on considère la figure 1.2, il semble bien que « nos » combustibles fossiles ont dépassé leur pic. Le Royaume-Uni a un problème imminent de sécurité d'approvisionnement qui lui est particulier, et connu sous le nom de « fossé énergétique ». Un nombre substantiel de vieilles centrales à charbon et nucléaires vont fermer dans les décennies à venir (figure 1.3) et il y a donc un risque que la demande en électricité dépasse de temps en temps l'offre, si des plans appropriés ne sont pas mis en œuvre.



FIGURE 1.1. « J'adore. Je déteste. Deux bonnes raisons de rejoindre Greenpeace ».

Ce prospectus de Greenpeace est arrivé dans ma boîte aux lettres en mai 2006. Ces adorables éoliennes peuvent-elles vraiment remplacer ces détestables tours de refroidissement ?

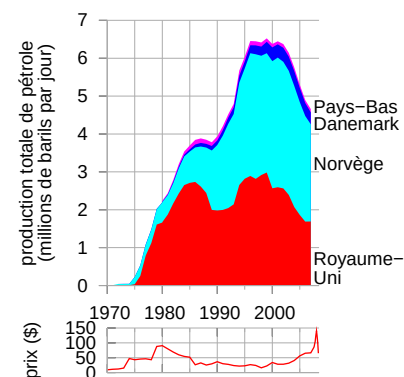


FIGURE 1.2. Est-ce qu'on arrive au bout de « nos » combustibles fossiles ? Production totale de pétrole brut en provenance de mer du Nord, et prix du baril de pétrole en dollars de 2006.

Troisièmement, il est très probable que l'utilisation des combustibles fossiles est en train de changer le climat. Le changement climatique est imputable à plusieurs activités humaines, mais le plus gros contributeur à ce changement est l'augmentation de l'effet de serre produit par le dioxyde de carbone (CO_2). La plupart des émissions de dioxyde de carbone provient de la combustion des combustibles fossiles. Et la principale raison qui nous fait brûler ces combustibles fossiles, c'est la récupération de l'énergie qu'elles contiennent. Donc, pour résoudre le changement climatique, nous devons trouver une autre manière de récupérer de l'énergie. Le réchauffement climatique est principalement un problème d'énergie.

Quelle que soit la préoccupation qui vous motive parmi ces trois catégories, il nous faut des chiffres sur l'énergie, et des politiques qui font que le compte est bon.

Les deux premières préoccupations sont des simples motivations égoïstes à réduire de manière drastique l'utilisation des combustibles fossiles. La troisième préoccupation, le changement climatique, est une motivation plus altruiste — ce n'est pas nous qui aurons à supporter le poids du changement climatique, mais les générations futures, et ceci pendant des centaines d'années. Certaines personnes considèrent que le changement climatique n'est pas leur responsabilité. Ils disent des choses du genre : « Pourquoi faire quelque chose ? La Chine est complètement hors de contrôle ! » Pour cette raison, je vais maintenant discuter un peu plus longuement du changement climatique, parce qu'en écrivant ce livre, j'ai appris des faits intéressants qui éclairent ces questions éthiques. Si vous n'avez aucun intérêt pour le changement climatique, n'hésitez pas à sauter directement à la section suivante, à la page 17.

La motivation du changement climatique

L'argumentation de la motivation du changement climatique s'articule en trois étapes : (1) la combustion des combustibles fossiles par l'homme fait augmenter la concentration en dioxyde de carbone ; (2) le dioxyde de carbone est un gaz à effet de serre ; (3) l'accroissement de l'effet de serre fait augmenter la moyenne des températures mondiales (ainsi que beaucoup d'autres effets). Nous commençons par le fait que les concentrations de dioxyde de carbone sont en hausse. La figure 1.4 montre les mesures de la concentration de CO_2 dans l'atmosphère de l'an mil après Jésus-Christ jusqu'à aujourd'hui. Certains « sceptiques » ont affirmé que l'augmentation récente de la concentration en CO_2 est un phénomène naturel. Est-ce que « sceptique » signifie « une personne qui n'a pas jeté ne serait-ce qu'un coup d'œil aux données » ? Vous ne croyez pas plutôt qu'il est possible que *quelque chose* se soit passé entre 1800 et 2000 ? Quelque chose qui ne faisait pas partie des processus naturels présents durant les mille ans précédents ?

Il s'est effectivement passé quelque chose, qu'on appelle la Révolution industrielle. J'ai marqué sur le graphique l'année 1769, qui a vu James

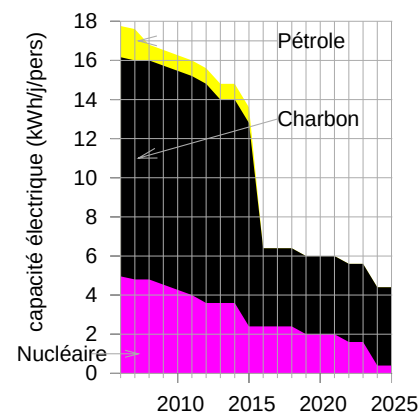


FIGURE 1.3. Le déficit énergétique provoqué par la fermeture des centrales britanniques, tel que projeté par EDF. Ce graphique montre la capacité de production prévue pour les centrales nucléaires, au charbon et au fioul, en kilowatts-heures par jour et par personne. La capacité de production est la puissance maximum que peut fournir une source.

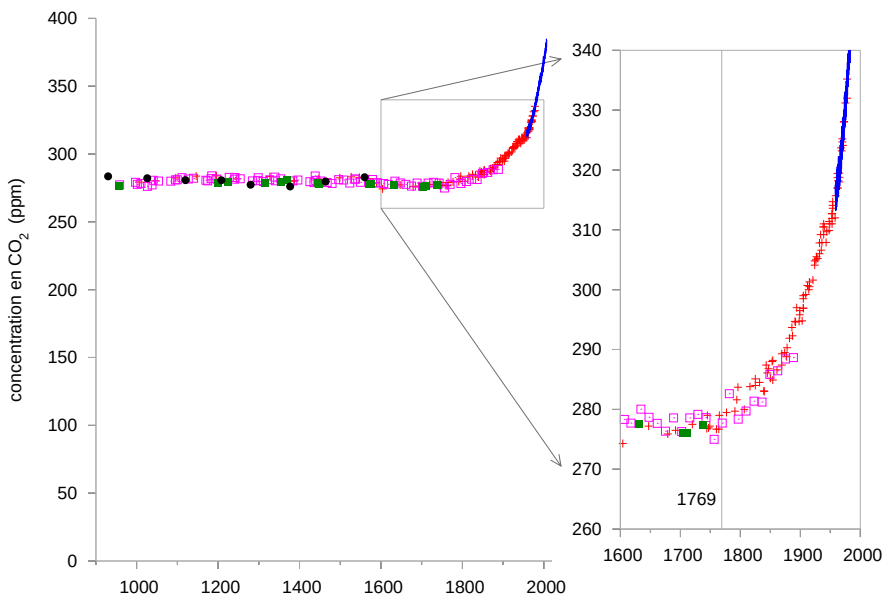


FIGURE 1.4. Concentrations de dioxyde de carbone (CO_2) (en parties par million) durant les derniers 1 100 ans, mesurées à partir de l'air emprisonné dans les carottes de glace jusqu'en 1977) et directement à Hawaï (à partir de 1958.)

Il me semble que quelque chose de nouveau a fait son apparition entre 1800 et 2000. J'ai marqué l'année 1769, durant laquelle James Watt a fait breveter son moteur à vapeur. (Dans les faits, le premier moteur à vapeur jamais inventé l'a été 70 ans avant, en 1698, mais celui de Watt était bien plus efficace.)

Watt faire breveter son moteur à vapeur. Même si dans les faits, le premier moteur à vapeur jamais construit l'a été en 1698, le moteur à vapeur de Watt était plus efficace et a vraiment enclenché la Révolution industrielle. L'une des principales applications du moteur à vapeur a été le pompage de l'eau hors des mines de charbon. La figure 1.5 montre la manière dont a évolué la production de charbon en Grande-Bretagne à partir de 1769, exprimée en milliards de tonnes de CO_2 relâchées dans l'air par le fait de brûler le charbon.

En 1800, le charbon était utilisé pour fabriquer du fer, pour construire des navires, pour chauffer des bâtiments, pour propulser les locomotives et d'autres machines, et bien sûr pour actionner les pompes qui permettaient de gratter encore plus de charbon depuis l'intérieur des collines d'Angleterre et du Pays de Galles. La Grande-Bretagne était formidablement bien pourvue en charbon : quand la Révolution industrielle a commencé, la quantité de carbone reposant sous forme de charbon sous la Grande-Bretagne était à peu près la même que la quantité présente sous forme de pétrole sous l'Arabie saoudite.

Dans les 30 ans qui se sont écoulés entre 1769 à 1800, la production annuelle de charbon en Grande-Bretagne a doublé. Après 30 ans de plus (1830), elle avait encore doublé. Il a suffi de 20 ans pour faire encore doubler la production (1850), et encore 20 ans pour la faire doubler une fois de plus (1870). Ce charbon a permis à la Grande-Bretagne de dominer le globe. La prospérité qu'il apporta à l'Angleterre et au Pays de Galles s'est traduite par un siècle de croissance démographique sans précédent :

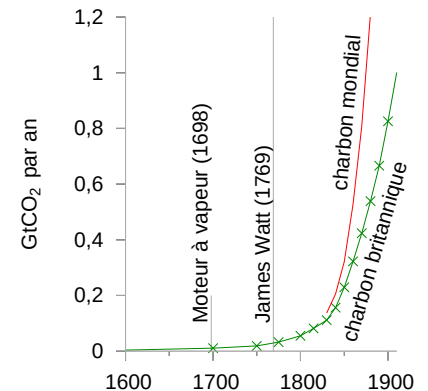
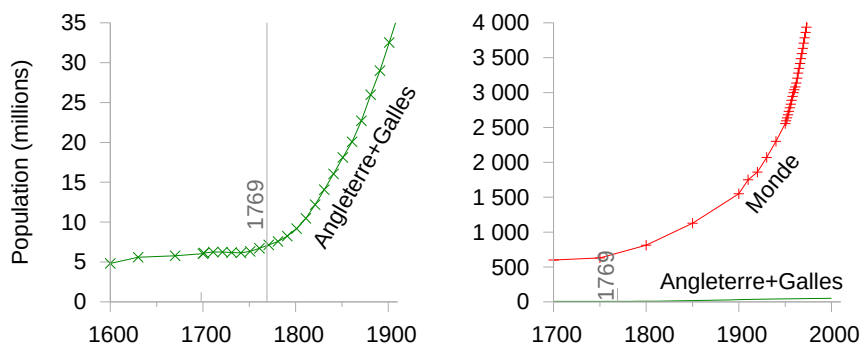
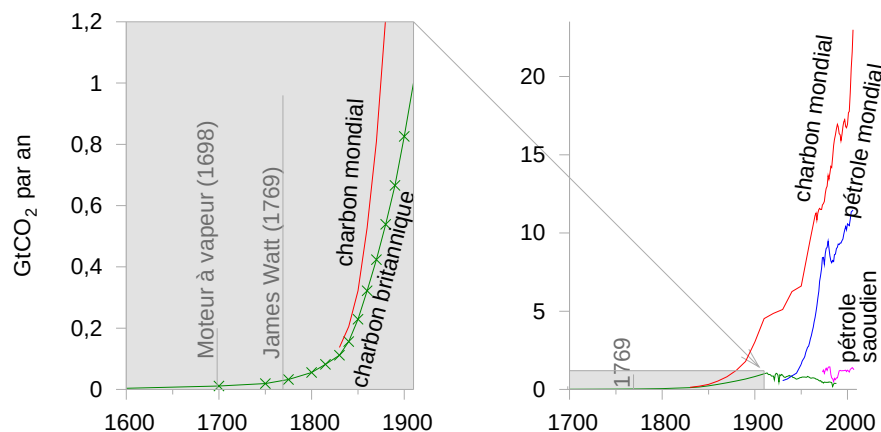


FIGURE 1.5. L'historique de la production de charbon en Grande-Bretagne et dans le monde entre 1600 et 1910. Les volumes de production sont exprimés en milliards de tonnes de CO_2 — une unité qui semble incompréhensible, je suis d'accord, mais pas de panique : on va l'individualiser rapidement.



Finalement les autres pays ont pris le train en marche et la Révolution industrielle s'est propagée. La figure 1.6 montre la production britannique et la production mondiale de charbon sur la même échelle que la figure 1.5, en faisant coulisser la fenêtre temporelle 50 ans plus tard. La production britannique de charbon a atteint son pic en 1910, mais pendant ce temps, la production mondiale de charbon a continué à doubler tous les 20 ans. Il est difficile de montrer l'histoire de la production de charbon sur un seul graphique. Pour montrer ce qui s'est passé au cours des 50 années *suivantes* à la même échelle, le livre devrait faire un mètre de haut ! Pour faire face à cette difficulté, on peut soit réduire l'axe vertical :



soit compresser l'axe vertical d'une manière non uniforme, de sorte que des petites quantités et des grandes quantités puissent être vues en même temps dans un seul graphique. Une bonne façon de compresser l'axe est appelé une échelle logarithmique, et c'est ce que j'ai utilisé dans les deux graphiques du bas de la figure 1.7 (page 10). Sur une échelle logarithmique, toutes les augmentations d'un facteur dix (de 1 à 10, 10 à 100, de 100 à 1 000) sont représentées par des distances égales sur la page. Sur une échelle logarithmique, une quantité qui croît à un taux constant (ce qui est appelé « croissance exponentielle ») ressemble à une ligne droite. Les graphiques logarithmiques sont épatants pour comprendre la notion

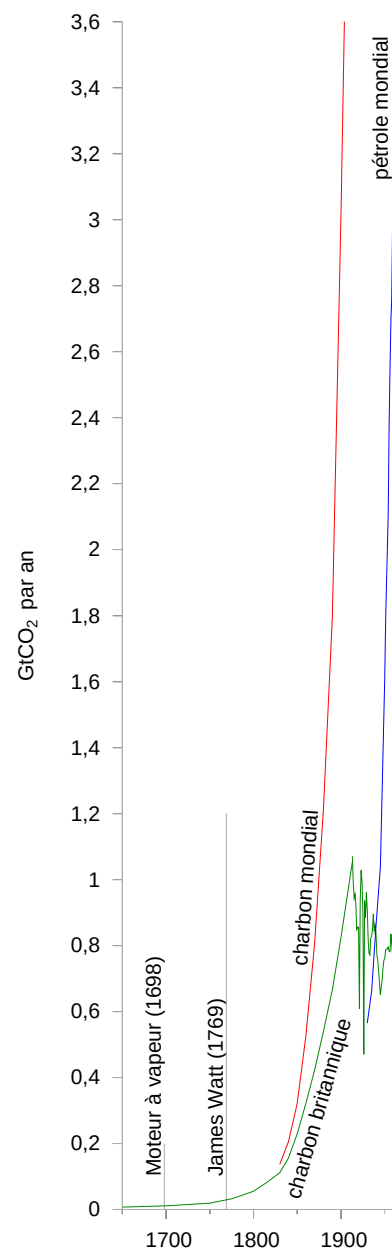


FIGURE 1.6. Ce qui arriva ensuite.

L'historique de la production de charbon en Grande-Bretagne et dans le monde, entre 1650 et 1950, avec la même échelle que pour la figure 1.5.

de croissance. Bien que les graphiques ordinaires sur les pages 7 et 8 nous informent que les productions de charbon britanniques et mondiales ont eu une croissance remarquable et que les populations britanniques et mondiales ont augmenté de manière remarquable, les taux de croissance relatifs ne sont pas évidents dans ces graphiques ordinaires. Les graphiques logarithmiques nous permettent de comparer les taux de croissance. En regardant les pentes des courbes de population, par exemple, on peut voir que le taux de croissance de la population mondiale au cours des 50 dernières années a été un peu plus élevé que le taux de croissance en Angleterre et au Pays de Galles en 1800.

Entre 1769 à 2006, la production annuelle mondiale de charbon a été multipliée par 800. Et elle continue d'augmenter encore aujourd'hui. D'autres combustibles fossiles sont aussi extraits — le graphique du milieu de la figure 1.7 montre la production de pétrole par exemple — mais en termes d'émissions de CO₂, le charbon est toujours roi.

La combustion des carburants fossiles est la principale raison pour laquelle les concentrations de CO₂ ont augmenté. C'est un fait, mais attendez : j'entends un bourdonnement persistant provenant d'une bande d'inactivistes du changement climatique, là-bas. Qu'est-ce qu'ils disent ? Voilà par exemple ce qu'écrit Dominic Lawson, un chroniqueur de *The Independent* :

« Le fait de brûler des combustibles fossiles expédie environ **sept gigatonnes** de CO₂ par an dans l'atmosphère, ce qui semble beaucoup. Cependant, la biosphère et les océans envoient environ **1 900 gigatonnes** et **36 000 gigatonnes** de CO₂ par an dans l'atmosphère — [...] une raison pour laquelle certains d'entre nous sont sceptiques du premier rôle attribué à la combustion des carburants fossiles par les humains dans l'effet de serre. Vouloir réduire les émissions de CO₂ anthropiques est de la mégalomanie, exagérant l'importance de l'homme. Les politiciens ne peuvent pas changer le temps. »

Je prête une oreille attentive au scepticisme, et tout ce que les sceptiques disent n'est pas de la crotte — mais ce type de journalisme irresponsable comme celui de Dominic Lawson mérite d'être traité d'un bon coup de chasse d'eau.

Le premier problème avec la proposition de Lawson est que *les trois chiffres* qu'il mentionne (7, 1 900, et 36 000) sont *faux* ! Les chiffres corrects sont 26, 440, et 330. Mais laissons ces erreurs de côté, et répondons à l'argument principal de Lawson, en l'occurrence la petitesse relative des émissions d'origine humaine.

Oui, les flux naturels de CO₂ *sont* plus grands que le flux supplémentaire que nous avons ouvert il y a 200 ans, lorsque nous nous sommes sérieusement mis à brûler des combustibles fossiles. Mais il est carrément mensonger de quantifier les grands flux naturels *vers* l'atmosphère, sans

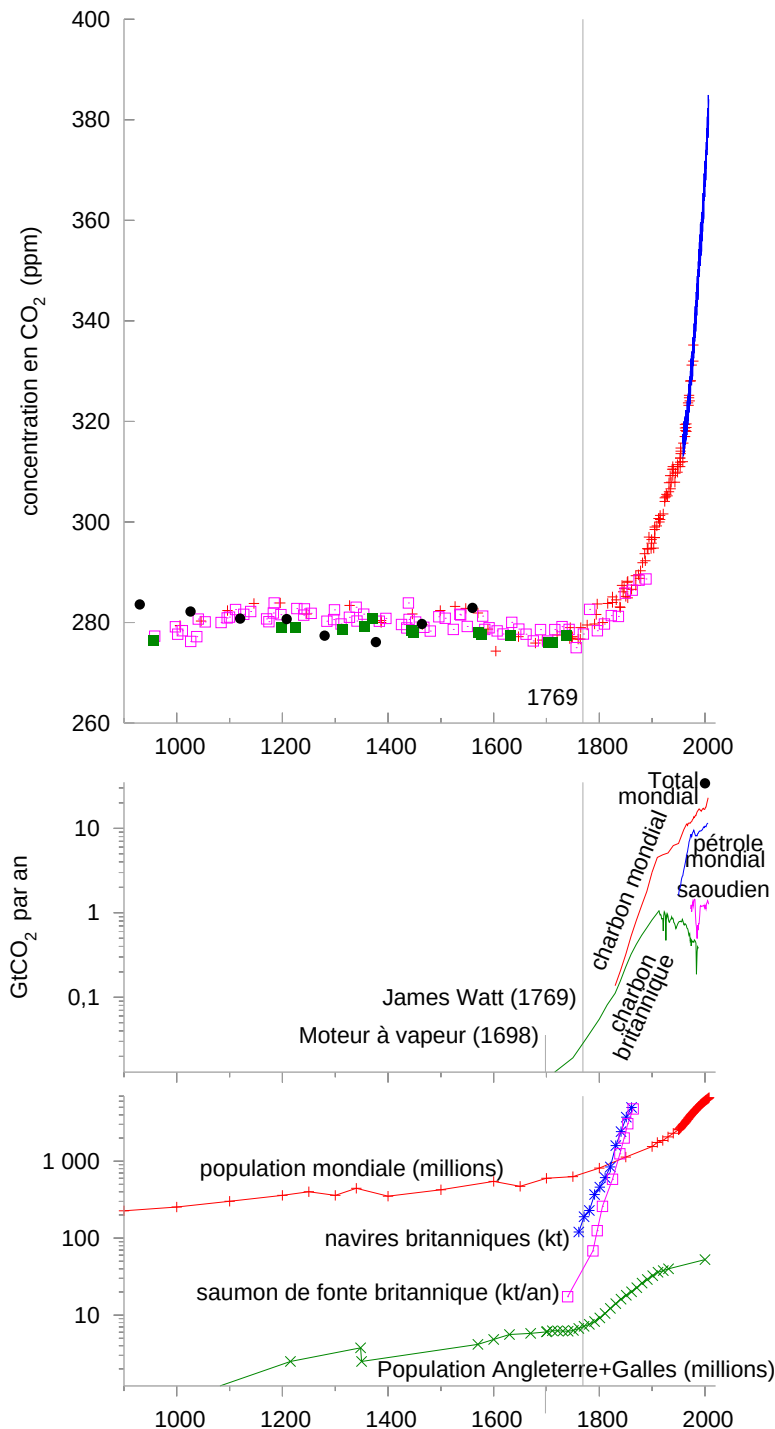


FIGURE 1.7. Le graphique du haut montre les concentrations de dioxyde de carbone (CO₂) (en parties par million) durant les derniers 1 100 ans — autrement dit, les mêmes données que celles que montrait la figure 1.4.

Voici un portrait de James Watt et de son moteur à vapeur de 1769.



Le graphique du milieu montre (avec une échelle logarithmique) l'historique de la production de charbon britannique, de pétrole saoudien, de charbon et de pétrole dans le monde, et (à partir du point en haut à droite) le total de toutes les émissions de gaz à effet de serre en l'an 2000. Tous les rythmes de production sont exprimés en émissions de CO₂ associées.

Le graphique du bas montre (avec une échelle logarithmique) certaines des conséquences de la Révolution industrielle : de fortes augmentations de la population en Angleterre, puis, plus tard, dans le monde ; la remarquable croissance qu'a connue la production britannique de saumons de fonte (en milliers de tonnes par an) ; la croissance du tonnage des navires britanniques (en milliers de tonnes).

Contrairement aux graphiques classiques des pages précédentes, l'échelle logarithmique nous permet de voir à la fois l'évolution de la population britannique et mondiale sur un seul et même graphique, et de relever des caractéristiques intéressantes à leur sujet.

mentionner les flux presque exactement égaux *partant* de l'atmosphère vers la biosphère et les océans. Le point important est que ces flux *naturels* de et vers l'atmosphère sont toujours restés quasiment en équilibre depuis des millénaires. Le fait que ces flux naturels soient plus grands que les émissions humaines n'a donc aucune importance. Les flux naturels *s'annulent mutuellement*. Par conséquent, les flux naturels, aussi grands soient-ils, ont gardé la concentration de CO₂ dans l'atmosphère et l'océan *inchangée* durant les derniers milliers d'années. Brûler des combustibles fossiles, en revanche, crée un *nouveau* flux de carbone qui, même s'il est petit, *n'est pas annulé*. Il y a une analogie assez simple : imaginez une zone de contrôle des passeports d'un aéroport. Mille passagers arrivent toutes les heures, et il y a exactement le bon nombre de fonctionnaires pour traiter *mille passagers par heure*. Il y a une petite file d'attente, mais comme le rythme d'arrivée des passagers correspond à leur rythme de contrôle, la file ne s'allonge pas. Maintenant imaginez que, à cause du brouillard, quelques vols supplémentaires sont détournés d'un autre petit aéroport. Cette source ajoute *50 passagers par heure* au hall d'arrivée — un surplus minime par rapport au rythme initial de mille arrivées par heure. Au début, les autorités n'augmentent pas le nombre des fonctionnaires, qui continuent à traiter tout juste mille passagers par heure. Et que se passe-t-il ensuite ? Lentement mais sûrement, *la file d'attente s'allonge*. Brûler des combustibles fossiles est indéniablement en train d'augmenter la concentration de CO₂ dans l'atmosphère et la surface des océans. Aucun climatologue ne remet en cause ce fait. Quand il s'agit de concentrations de CO₂, l'homme *a* de l'importance.

Bon, OK. Brûler des combustibles fossiles augmente les concentrations de CO₂ de manière significative. Et alors ? Est-ce que c'est si important ? « Le carbone, c'est naturel ! », nous rappelle le lobby du pétrole, « le carbone c'est la vie ! » Si le CO₂ n'avait pas d'effets nocifs, alors, en effet, les émissions de carbone seraient sans importance. Cependant, le dioxyde de carbone est un gaz à effet de serre. Ce n'est pas le plus puissant de tous, c'est vrai, mais il a son importance. Ajoutez-en dans l'atmosphère, et il fera ce que font tous les gaz à effet de serre : absorber une partie du rayonnement infrarouge (la chaleur) qui s'échappe de la Terre et le réémettre dans toutes les directions. Renvoyer ce flux de chaleur dans toutes les directions a pour effet d'entraver l'évacuation de la chaleur, comme le ferait une couette. Donc le dioxyde de carbone a un pouvoir réchauffant. Cette constatation n'est pas fondée sur des relevés complexes de températures planétaires, mais sur les simples propriétés physiques des molécules de CO₂. Les gaz à effet de serre sont une sorte de couette planétaire, et le CO₂ est l'une des couches de cette couette.

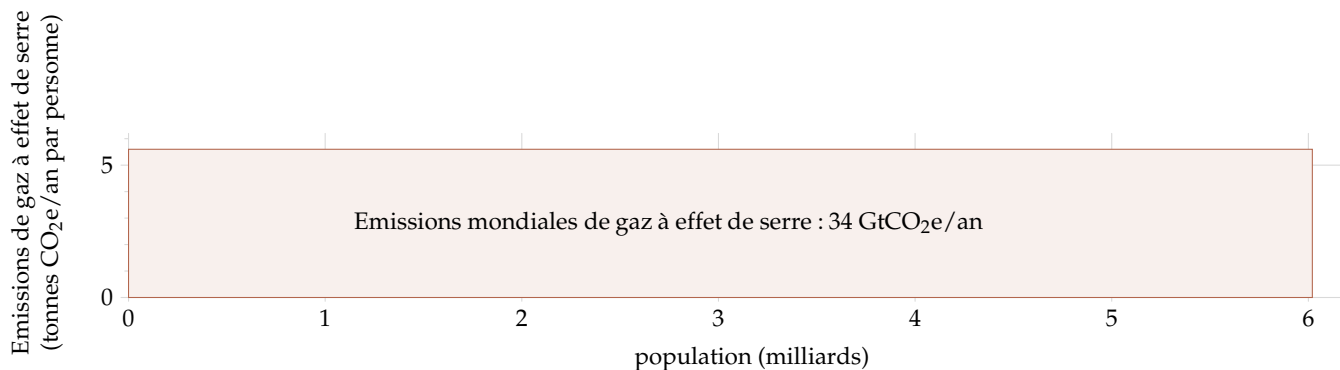
Donc, si l'humanité parvient à doubler ou tripler la concentration de CO₂ (ce que est certainement ce vers quoi nous allons, si on continue sans rien changer à nos habitudes), que va-t-il se passer ? Là, il y a de nombreuses incertitudes. La science du climat est quelque chose de difficile.

Le climat est une machine complexe et chatouilleuse, et on ne sait pas exactement quel niveau de réchauffement produirait un doublement de la concentration de CO_2 . Le consensus des meilleurs modèles climatiques semble être que le doublement de la concentration de CO_2 aurait à peu près le même effet qu'une augmentation de 2 % de l'intensité du soleil, et ferait grimper les températures moyennes à la surface du globe de quelque chose comme 3°C . Cela serait ce que les historiens appellent avec un sens aigu de la litote un « Truc assez moche ». Je ne vais pas énumérer la litanie des conséquences sévères probables, je suis sûr que vous les avez déjà entendues. La litanie commence par « la calotte glaciaire du Groenland se mettrait progressivement à fondre, et sur une période de l'ordre de quelques siècles, le niveau des mers monterait d'environ 7 mètres ». Le fardeau de la litanie repose sur les épaules des générations futures. De telles températures n'ont pas été connues sur Terre depuis au moins 100 000 ans, et on peut tout à fait imaginer que l'écosystème en soit à ce point altéré que la Terre arrête de fournir certains des biens et services que nous considérons aujourd'hui comme acquis.

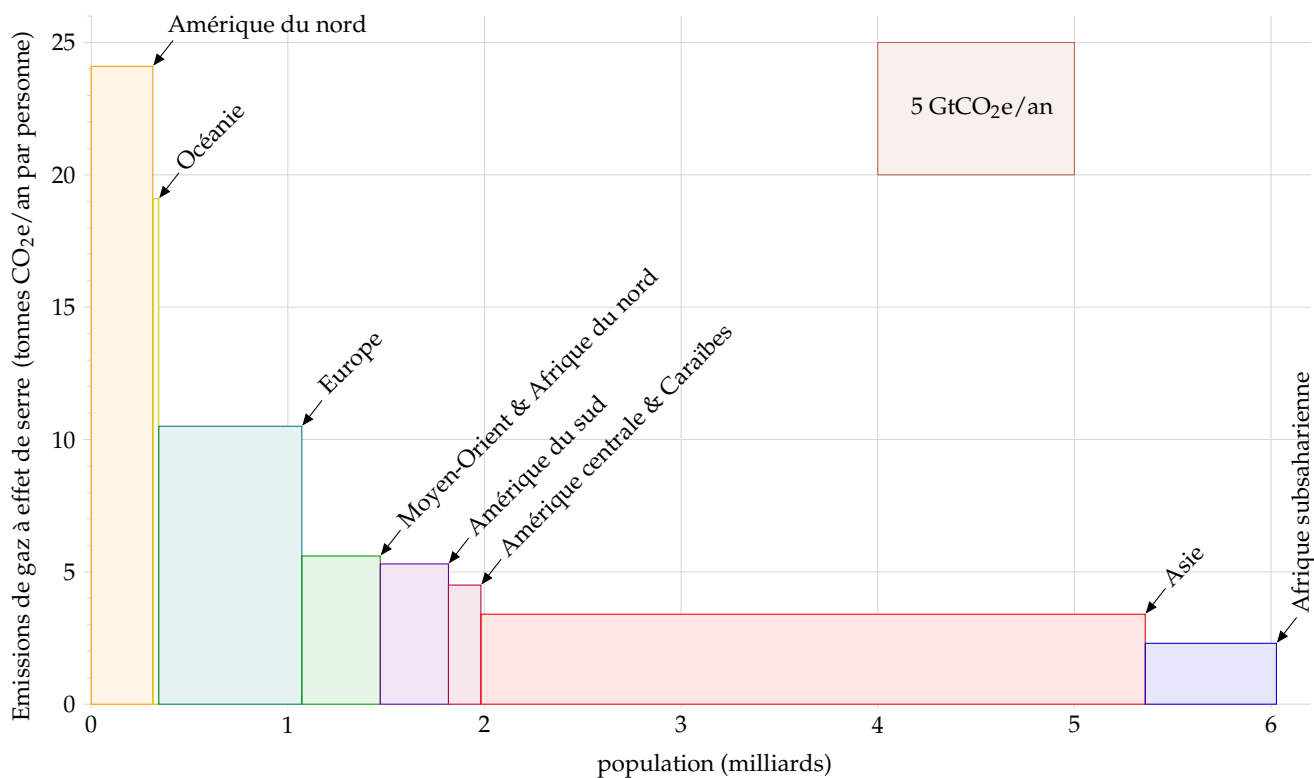
La modélisation du climat est quelque chose de difficile et truffé d'incertitudes. Mais l'incertitude sur la réponse précise du climat aux gaz à effet de serre supplémentaires ne justifie en rien l'inaction. Si vous conduisez une moto à grande vitesse près d'une falaise dans le brouillard, le fait de ne pas avoir de bonne carte de la falaise justifie-t-il de *ne pas* ralentir ?

Mais alors qui doit ralentir la moto ? Qui doit mettre de l'ordre dans ses émissions de carbone ? Qui est responsable du changement climatique ? Il s'agit d'une question éthique, bien sûr, pas d'une question scientifique, mais les débats éthiques doivent toujours reposer sur des faits. Étudions maintenant les faits connus au sujet des émissions de gaz à effet de serre. Tout d'abord, un mot sur les unités dans lesquelles on les mesure. Les gaz à effet de serre incluent notamment le dioxyde de carbone, le méthane et le protoxyde d'azote. Chacun de ces gaz a des propriétés physiques différentes. Par convention, on exprime toutes les émissions de ces gaz en « quantités équivalentes de dioxyde de carbone », où « équivalent » signifie « avoir le même pouvoir réchauffant sur une période de 100 ans ». Par commodité, on abrège une tonne d'équivalent-dioxyde de carbone par « 1 t eq CO_2 », et un milliard de tonnes par « 1 Gt eq CO_2 » (une gigatonne).

En l'an 2000, les émissions mondiales de gaz à effet de serre étaient d'environ 34 milliards de tonnes équivalent CO_2 par an. C'est un chiffre absolument incompréhensible. Mais on peut le rendre plus facile à comprendre et à sentir au niveau individuel, en le divisant par le nombre de personnes sur Terre, 6 milliards, pour obtenir la quantité de gaz à effet de serre émise *par personne*, qui est d'à peu près $5\frac{1}{2}$ tonnes eq CO_2 par personne et par an. On peut donc représenter les émissions mondiales par un rectangle dont la largeur est la population (6 milliards) et dont la hauteur correspond aux émissions par habitant.



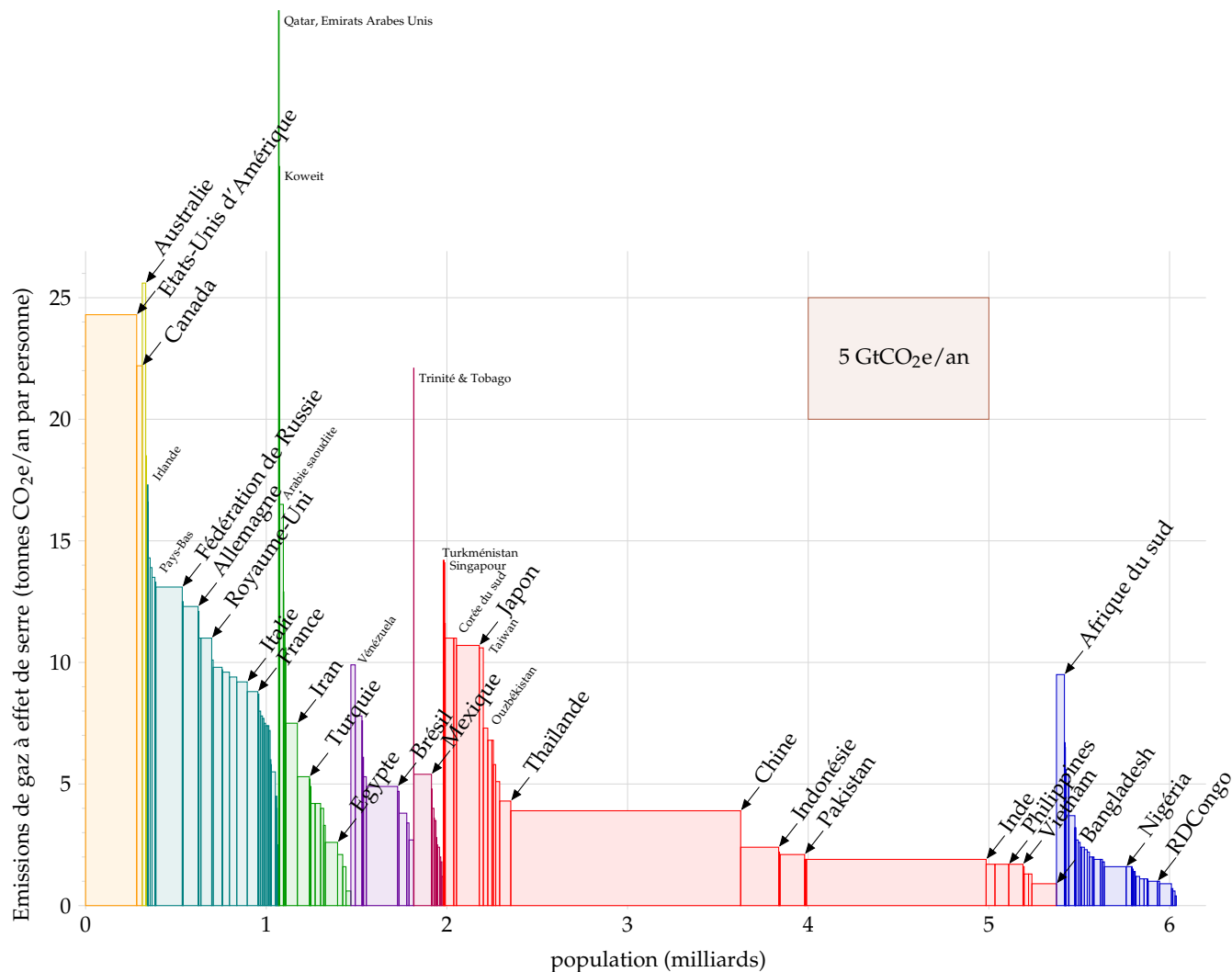
Même si tous les hommes sont nés égaux, ils n'émettent pas tous 5^{1/2} tonnes de CO₂ par an. On peut décomposer les émissions mondiales de l'an 2000 pour montrer comment le rectangle de 34 milliards de tonnes se répartit entre les différentes régions du monde :



Cette figure, qui est sur la même échelle que la précédente, divise le monde en huit régions. Chaque surface d'un rectangle représente les émissions de gaz à effet de serre d'une région. La largeur du rectangle est la population de la région, et la hauteur est la moyenne des émissions par habitant dans cette région.

En l'an 2000, les émissions de gaz à effet de serre par habitant étaient en Europe deux fois la moyenne mondiale ; et en Amérique du Nord, quatre fois la moyenne mondiale.

Nous pouvons continuer à subdiviser, en séparant les régions en pays. C'est là que ça devient vraiment intéressant :



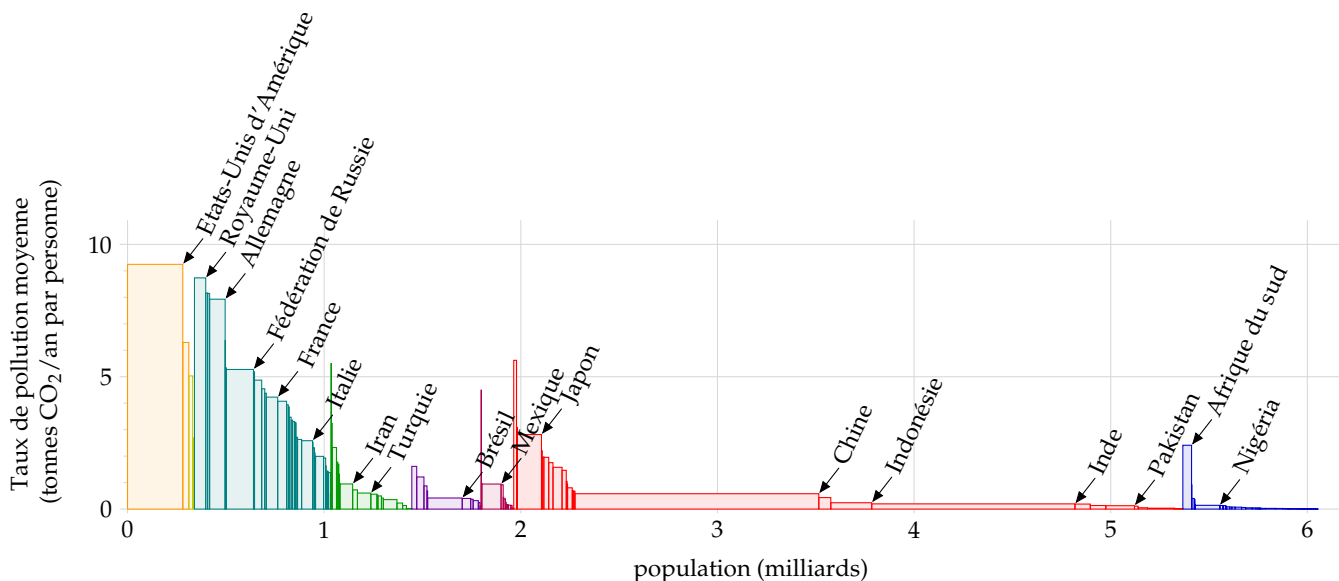
Les pays qui ont les émissions par habitant les plus élevées sont l'Australie, les États-Unis et le Canada. Les pays européens, le Japon et l'Afrique du Sud suivent de près. Parmi les pays européens, le Royaume-Uni est résolument dans la moyenne. Qu'en est-il de la Chine, ce vilain pays « complètement hors de contrôle » ? Oui, le rectangle de la Chine a à peu près la même surface que celui des États-Unis, mais le fait est que leurs émissions par habitant sont *en-dessous* de la moyenne mondiale. Les émissions par habitant en Inde sont inférieures à la *moitié* de la moyenne mondiale.

En outre, il est bon de rappeler qu’une bonne partie des émissions industrielles de la Chine et de l’Inde est associée à la fabrication d’objets destinés aux pays riches.

Ainsi, en supposant « qu’il faille faire quelque chose » pour réduire les émissions des gaz à effet de serre, qui a une responsabilité particulière de faire quelque chose ? Comme je l’ai dit précédemment, c’est une question éthique. Mais je trouve qu’il est difficile d’imaginer un système éthique qui nierait que la responsabilité en incombe plutôt aux pays sur le côté gauche de ce diagramme — les pays dont les émissions sont deux, trois ou quatre fois la moyenne mondiale. Les pays qui ont les moyens de payer. Des pays comme la Grande-Bretagne et les États-Unis, par exemple.

La responsabilité historique de l’impact climatique

Si nous admettons que le climat a été endommagé par l’activité humaine, et que quelqu’un doit y remédier, qui doit payer ? Certains disent : « pollueur, payeur ». Les figures qui précèdent montrent qui sont aujourd’hui les pollueurs. Mais ce n’est pas le *rythme* de pollution au CO₂ qui compte, ce sont les émissions *totales* cumulées ; une partie importante du dioxyde de carbone émis (environ un tiers de celui-ci) va rester dans l’atmosphère pour au moins 50 ou 100 ans. Si nous acceptons l’idée éthique selon laquelle « c’est le pollueur qui doit être le payeur », alors nous devrions nous demander quelle est l’empreinte historique de chaque pays. La prochaine image montre les émissions cumulées de CO₂ de chaque pays, exprimées dans un taux moyen d’émissions sur la période 1880–2004.



Bravo, la Grande-Bretagne ! Elle est sur le podium ! Peut-être ne sommes-nous que dans la moyenne des pays européens aujourd’hui, mais au ta-

bleau des émetteurs historiques par habitant, nous ne nous en laissons remonter que par les États-Unis.

Bon, ça suffit avec l'éthique. Qu'est-ce qu'il faut faire, selon les scientifiques, pour éviter que la température moyenne sur Terre augmente de 2 °C (2 °C est le niveau au-dessus duquel ils nous prédisent un bon nombre de calamités)? Le consensus est clair. Nous devons décrocher de notre dépendance aux combustibles fossiles, et nous devons le faire rapidement. Certains pays, y compris la Grande-Bretagne, se sont engagés à réduire d'au moins 60 % leurs émissions de gaz à effet de serre d'ici 2050, mais il faut insister sur le fait qu'il y a peu de chances qu'une baisse de 60 % des émissions, aussi radicale qu'elle paraisse, soit à la hauteur. Si les émissions mondiales étaient progressivement réduites de 60 % d'ici 2050, les climatologues estiment qu'il y a plus de chances que les températures planétaires augmentent de plus de 2 °C, que de chances qu'elles augmentent de moins de 2 °C. La figure 1.8 montre le genre de réductions qu'il nous faut viser, grâce à deux scénarios d'émissions pas trop risqués présentées par Baer et Mastrandrea (2006) dans un rapport de l'*Institute for Public Policy Research*. La courbe inférieure présume un déclin des émissions qui commence en 2007, avec des émissions mondiales totales chutant d'environ 5 % par an. La courbe supérieure suppose un bref délai avant le début du déclin, puis une baisse de 4 % par an des émissions mondiales. D'après les prédictions, ces deux scénarios devraient offrir une chance modeste d'éviter une hausse de température de 2 °C au-dessus du niveau pré-industriel. Dans le scénario inférieur, la probabilité que l'élévation de température *dépasse* 2 °C est estimée à 9–26 %. Dans le scénario haut, elle est estimée à 16–43 %. Soit dit en passant, ces trajectoires d'émissions « pas trop risquées » impliquent des réductions d'émissions nettement plus brutales que tous les scénarios présentés par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) ou par le rapport Stern (2007).

Ces trajectoires pas trop risquées nécessitent que les émissions mondiales chutent de 70 % ou 85 % d'ici 2050. Qu'est-ce que cela signifierait pour un pays comme la Grande-Bretagne? Si on souscrit à l'idée de « contraction et convergence », qui signifie que tous les pays visent à terme à une égalité des émissions par habitant, alors la Grande-Bretagne doit viser des réductions de plus de 85 % : il faudrait descendre des 11 tonnes actuelles d'éq CO₂ par personne et par an, à à peu près **1 tonne par personne et par an en 2050**. Face à pareille coupe sombre, je suggère que la meilleure façon d'envisager le sujet soit : *ne plus utiliser du tout de combustibles fossiles*.

Une dernière chose concernant la motivation du changement climatique : bien qu'il y ait tout un éventail d'activités humaines qui émettent des gaz à effet de serre, la plus grande cause d'émissions est de loin la **consommation d'énergie**. Certaines personnes justifient le fait de ne rien changer à leur consommation d'énergie par des excuses telles que « le méthane dans les rots des vaches contribue plus au réchauffement que le

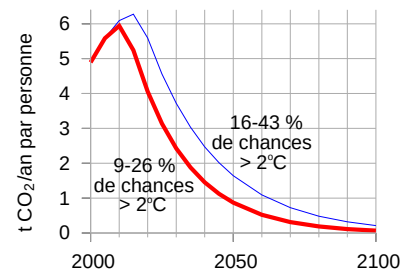


FIGURE 1.8. Émissions planétaires pour deux scénarios étudiés par Baer et Mastrandrea, exprimées en tonnes de CO₂ par an et par personne, au sein d'une population de 6 milliards d'individus. Les deux scénarios sont considérés comme offrant une modeste chance d'éviter une hausse des températures supérieure à 2 °C par rapport aux niveaux pré-industriels.

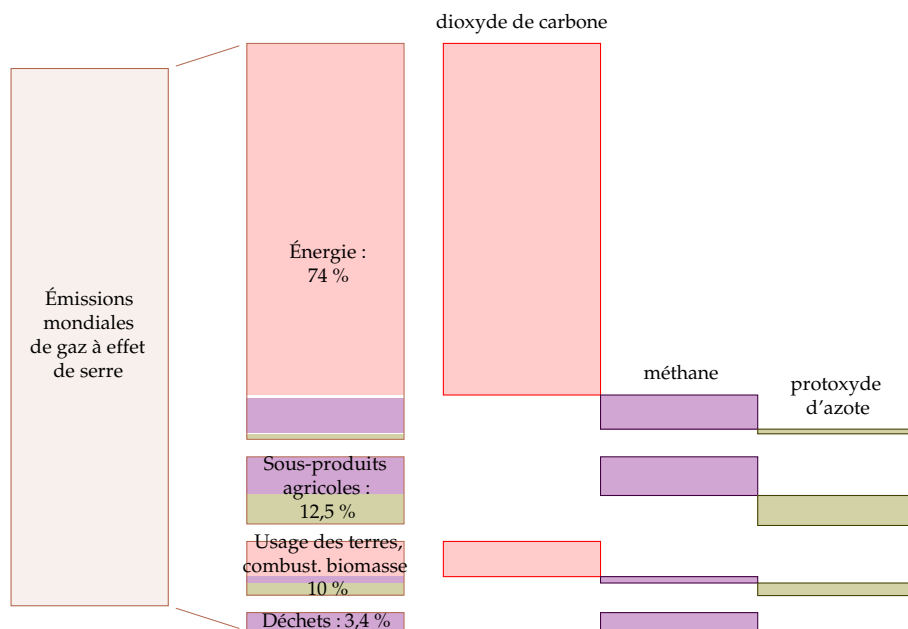


FIGURE 1.9. Répartition des émissions mondiales de gaz à effet de serre (2000) par cause et par gaz. « Énergie » inclut les centrales énergétiques, le transport, le traitement des combustibles fossiles et la consommation d'énergie des bâtiments. « Usage des terres, combustion de la biomasse » signifie les changements d'usage des terres, la déforestation, et le fait de brûler de la biomasse non renouvelée, comme la tourbe. « Déchets » comprend l'évacuation et le retraitement des déchets. Les tailles indiquent le pouvoir réchauffant global sur un siècle de chaque source. Source : *Emission Database for Global Atmospheric Research*.

transport aérien ». Certes, les émanations agricoles ont contribué pour un huitième des émissions de gaz à effet de serre en l'an 2000. Mais la consommation d'énergie y a contribué pour plus des trois quarts (figure 1.9). Le problème du changement climatique est principalement un problème d'énergie.

Avertissements au lecteur

Bon, ça suffit avec le changement climatique. Je vais supposer que nous sommes assez motivés pour renoncer aux combustibles fossiles. Quelle que soit votre motivation, le but de ce livre est de vous aider à démêler les chiffres et de faire les calculs afin que vous puissiez évaluer les politiques énergétiques ; et de poser les fondations factuelles vous permettant de voir pour quelles propositions *le compte est bon*. Je ne prétends pas que l'arithmétique et les chiffres dans ce livre soient nouveaux ; les livres de Goodstein, Lomborg et Lovelock que j'ai mentionnés, par exemple, sont pleins de chiffres intéressants et de calculs faits sur un coin de table, et il y a aussi de nombreuses autres sources utiles sur internet (voir les notes à la fin de chaque chapitre).

Mon but dans ce livre est de rendre ces chiffres simples et faciles à retenir ; de vous montrer comment vous pouvez trouver les chiffres par vous même ; et de rendre la situation tellement claire que tout lecteur qui réfléchit un peu sera capable d'en tirer des conclusions nettes. Je ne veux pas vous nourrir de mes propres conclusions. Les convictions sont plus

fortes si l'on se les fait soi-même, plutôt que si on vous les apprend. La compréhension est un processus créatif. Une fois que vous aurez lu ce livre, j'espère que vous aurez renforcé votre propre conviction de pouvoir démêler tout par vous-même.

Je tiens à souligner que les calculs que nous ferons sont délibérément imprécis. La simplification est une clé de la compréhension. Premièrement, en arrondissant les chiffres, nous les rendons plus faciles à mémoriser. Deuxièmement, des chiffres arrondis permettent des calculs rapides. Par exemple, dans ce livre, la population du Royaume-Uni est de 60 millions d'habitants, et la population du monde est 6 milliards. Je suis parfaitement capable de dénicher des chiffres plus précis, mais cette exactitude ferait obstacle à la fluidité du raisonnement. Par exemple, si nous apprenons que les émissions mondiales de gaz à effet de serre étaient en l'an 2000 de 34 milliards de tonnes d'équivalent CO_2 par an, alors nous pouvons instantanément noter, sans calculatrice, que les émissions moyennes par personne sont de 5 ou 6 tonnes d'équivalent CO_2 par personne et par an. Cette réponse approchée n'est pas exacte, mais suffisamment précise pour servir de base à des discussions intéressantes. Par exemple, si vous apprenez qu'un vol intercontinental aller-retour émet presque deux tonnes de CO_2 par passager, alors la connaissance de l'ordre de grandeur des émissions moyennes (5 tonnes et des poussières par personne et par an) vous aide à réaliser qu'un seul voyage correspond à plus d'un tiers des émissions carbone annuelles d'une personne moyenne.

Parce que je vais arrondir tous les chiffres que je vais écrire, parfois les chiffres intermédiaires (arrondis) d'un calcul ne correspondent pas exactement au résultat final ; mais ce résultat final (obtenu sans arrondi intermédiaire) est plus précis. Ces petits désagréments mineurs ne changent aucun des arguments que ce livre présente.

J'aime baser mes calculs sur mon expérience de tous les jours plutôt qu'en piochant dans des statistiques nationales impersonnelles. Par exemple, si je veux estimer la vitesse du vent typique de Cambridge, je me demande « à vélo, vais-je en général plus vite que le vent ? » La réponse est oui. Je peux donc en déduire que la vitesse du vent à Cambridge n'est que rarement plus rapide que ma vitesse typique à vélo, qui est de l'ordre de 20 km/h. Je confirme ces estimations de tous les jours avec les calculs d'autres personnes et avec des statistiques officielles. (Vous les retrouverez dans les notes de fin de chaque chapitre). Ce livre n'est pas destiné à être un recueil définitif de chiffres ultra précis. Il est plutôt conçu pour illustrer comment on peut utiliser des chiffres approximatifs dans le cadre de discussions constructives et consensuelles.

Dans mes calculs, j'utiliserai principalement le Royaume-Uni et occasionnellement l'Europe, l'Amérique, ou le monde entier, mais vous devriez facilement pouvoir refaire les calculs pour n'importe quel pays ou région qui vous intéresse.

Je vais conclure ce chapitre par quelques avertissements au lecteur. Non



« Regarde — c'est Low Carbon Emission Man ! »

FIGURE 1.10. Reproduit avec l'aimable autorisation de PRIVATE EYE / Peter Dredge
www.private-eye.co.uk.

seulement allons-nous prendre l'habitude d'arrondir les chiffres que nous calculons ; mais nous allons aussi négliger tout un tas de détails dont les investisseurs, les gestionnaires, et les économistes doivent tenir compte, les pauvres. Si vous essayez de lancer une technologie renouvelable, une augmentation des coûts de ne serait-ce que 5 % peut faire toute la différence entre le succès et l'échec : dans le monde des affaires, chaque détail compte. Mais 5 % est en-dessous du plancher radar de ce livre. Ce livre traite de facteurs 2 et de facteurs 10. Il parle des limites physiques des énergies renouvelables, pas de leur faisabilité économique réelle. Les conditions économiques changent tout le temps, mais les limites fondamentales ne s'en iront jamais. Il nous faut comprendre ces limites.

Les débats sur les politiques énergétiques sont souvent confus et passionnels parce que les gens mélangent ce qui relève du *factuel* et ce qui relève de l'*éthique*.

Voici quelques exemples d'**affirmations d'ordre factuel** : « au niveau planétaire, brûler des combustibles fossiles émet 35 milliards de tonnes d'équivalent CO₂ par an » ; « si les concentrations en CO₂ doublent, alors les températures moyennes mondiales vont augmenter de 1,5 à 5,8 °C dans les 100 prochaines années » ; « une augmentation de température de 2 °C entraînerait la fonte de la calotte glaciaire du Groenland d'ici 500 ans » ; ou encore « la fonte complète des glaces du Groenland entraînerait une hausse du niveau des mers de 7 mètres ».

Une affirmation d'ordre factuel est soit vraie, soit fausse. Arriver à le déterminer peut être difficile : c'est une question scientifique. Par exemple, les affirmations que je viens de donner sont soit vraies, soit fausses. Mais nous ne savons pas si elles sont toutes vraies. Certaines d'entre elles sont actuellement considérées « hautement probables ». La difficulté pour décider quelles affirmations d'ordre factuel sont vraies conduit à des débats au sein de la communauté scientifique. Mais avec suffisamment d'expériences et de discussions scientifiques, le caractère vrai ou faux de la plupart des affirmations d'ordre factuel pourra finalement être établi, du moins « au-delà de tout doute raisonnable ».

Voici des exemples d'**affirmations d'ordre éthique** : « il est injuste d'exploiter les ressources globales en en faisant payer le coût aux générations futures » ; « on ne devrait pas pouvoir polluer gratuitement » ; « il nous faut prendre des mesures pour nous assurer que le doublement des concentrations en CO₂ restent improbables » ; « les politiciens doivent se mettre d'accord sur un plafond des émissions de CO₂ » ; « les pays qui ont le plus émis de CO₂ pendant le siècle dernier ont la responsabilité de mener les actions de lutte contre le changement climatique » ; ou encore « il est juste de partager les droits d'émissions de CO₂ à parts égales au sein de la population mondiale ». Ces affirmations ne sont pas « soit vraies, soit fausses ». Nous pouvons y adhérer ou non en fonction de nos jugements éthiques, de nos valeurs. Les affirmations d'ordre éthique peuvent être incompatibles entre elles ; par exemple, le gouvernement de Tony Blair a annoncé une politique



« OK — on est d'accord. On annonce que "ne rien faire n'est pas un choix possible !" et puis on attend de voir si tout se passe bien... »

FIGURE 1.11. Reproduit avec l'aimable autorisation de PRIVATE EYE / Paul Lowe
www.private-eye.co.uk.

radicale d'émissions de CO₂ : « le Royaume-Uni doit réduire ses émissions de CO₂ de 60 % d'ici 2050 » ; au même moment, Gordon Brown, ministre des finances de ce même gouvernement, demandait avec insistance aux pays producteurs de pétrole d'*augmenter* leur production.

Ce livre vise clairement à parler des faits, pas de l'éthique. Il vise à les rendre clairs, pour que les gens puissent, ensuite, participer à un débat sérieux sur les décisions d'ordre éthique à prendre. Il vise à ce que chacun comprenne comment et à quel point les faits contraignent les choix qui sont devant nous. Comme tout scientifique qui se respecte, j'ai essayé de mettre de côté mes opinions sur les questions d'ordre éthique, même si j'ai pu malgré tout m'oublier ici ou là — je vous prie de m'en excuser par avance.

Qu'il soit *juste* ou non que l'Europe et l'Amérique du nord accaparent le beurre énergétique est une question d'ordre éthique. Je suis juste là pour vous rappeler le fait qu'on ne peut pas avoir à la fois le beurre et l'argent du beurre ; pour vous aider à rejeter les propositions d'action qui sont à côté de la plaque et inefficaces ; et pour vous aider à identifier les politiques énergétiques qui sont compatibles avec vos valeurs personnelles.

Il nous faut un programme pour lequel on puisse dire : le compte est bon !

Notes et bibliographie

À la fin de chaque chapitre, je note les détails des idées du chapitre, les sources des données et des citations, et des références où trouver des informations complémentaires.

Page n°

- 2 « [...] les énergies renouvelables sont la seule façon de le faire » ; « quelqu'un qui pense que les énergies renouvelables peuvent combler le fossé [énergétique] vit dans un monde totalement utopique et est, à mon avis, un ennemi du peuple. » Les citations sont tirées de l'émission *Any Questions ?* diffusée sur BBC Radio 4 le 27 janvier 2006 [ydoobr] . *Michael Meacher* a été ministre de l'environnement du Royaume-Uni entre 1997 et 2003. *Sir Bernard Ingham* a été un collaborateur de Margaret Thatcher lorsqu'elle était Premier ministre, et il a été chef du service d'information du gouvernement. Il est secrétaire de *Supporters of Nuclear Energy*.
- *Jonathon Porritt* (mars 2006). *Is nuclear the answer ?* [Le nucléaire est-il la réponse ?] Section 3. Recommandation aux ministres. www.sd-commission.org.uk
- 3 « Le nucléaire est un gouffre économique. », « Nous avons une quantité énorme de vent et de vagues. » Ann Leslie, journaliste, s'exprimant dans *Any Questions ?*, BBC Radio 4, 10 février 2006.
- *les habitants de Los Angeles ... de la Terre à Mars* — (The Earthworks Group, 1989, page 34).
- 4 targetneutral.com facture seulement 4 livres sterling (environ 6 euros) par tonne de CO₂ pour leur « neutralisation ». (Un prix nettement inférieur à celui proposé par d'autres entreprises de « compensation » que j'ai pu rencontrer). A ce prix-là, un Britannique type pourrait « neutraliser » ses 11 tonnes par an pour seulement 44 livres (55 euros) ! La preuve que les comptes du régime de « neutralisation » de BP ne sont pas bons vient du fait que ce projet n'a pas été certifié pour le *Gold Standard* www.cdmgoldstandard.org (Michael Schlup, communication personnelle). Fiona Harvey, du Financial Times, a révélé que de nombreux projets de « compensation carbone » avaient tout aussi peu de valeur que celui-là [2jhve6].

- *Ceux qui veulent promouvoir les énergies durables au lieu du nucléaire, par exemple, disent « des éoliennes maritimes pourraient alimenter tous les foyers britanniques ».* Fin 2007, le gouvernement britannique a annoncé qu’il permettrait la construction d’éoliennes offshore « en nombre suffisant pour alimenter tous les foyers du Royaume-Uni ». Le militant des Amis de la Terre chargé des campagnes pour les énergies renouvelables, Nick Rau, a déclaré que l’association saluait l’annonce gouvernementale. « Potentiellement, la puissance qui pourrait être générée par cette industrie est énorme », a-t-il indiqué. [25e59w]. Dans *The Guardian* [5o7mxk] : John Sauven, directeur exécutif de Greenpeace, a déclaré que ce projet équivalait à « une révolution éolienne ». « Et le Parti travailliste doit renoncer à son obsession pour le nucléaire, qui ne pourrait jamais réduire les émissions que d’environ 4 % dans un lointain avenir ». Nick Rau a déclaré : « Nous sommes ravis que le gouvernement prenne au sérieux le potentiel de l’énergie éolienne offshore, qui pourrait générer 25 % de l’électricité du Royaume-Uni d’ici 2020 ». Quelques semaines plus tard, le gouvernement a annoncé qu’il autoriserait la construction de nouvelles centrales nucléaires. « La décision d’aujourd’hui de donner le feu vert à une nouvelle génération de centrales nucléaires ... ne fera pas grand chose contre le changement climatique », ont mis en garde les Amis de la Terre [5c4o1c].

En fait, les deux développements proposés — des éoliennes offshore et du nucléaire — fourniraient tous deux exactement la même quantité d’électricité par an. L’énergie éolienne offshore totale autorisée de 33 GW produirait en moyenne 10 GW, soit 4 kWh par jour et par personne, et le remplacement de toutes les centrales nucléaires en fin de vie fournirait 10 GW, soit 4 kWh par jour et par personne. Et dans le même souffle, les militants anti-nucléaires arrivent à dire que l’option nucléaire « ne [ferait] pas grand chose », tandis que l’option éolienne [alimenterait] tous les foyers du Royaume-Uni. » En fait, « alimenter tous les foyers du Royaume-Uni » et « réduire les émissions de seulement 4 % », c’est la même chose, tout simplement.

- 4 *« la voiture propulsée à l’eau »* *New Scientist*, 29 juillet 2006, page 35. Cet article, titré « Une voiture qui roule avec de l’eau pourrait être disponible en 2009 », commençait ainsi :
« Oubliez les voitures qui roulent à l’alcool et aux huiles végétales. Bientôt, vous pourriez conduire votre voiture avec rien de plus que de l’eau dans le réservoir. Ce serait la voiture zéro-émission ultime. « Si l’eau n’est pas à première vue une source d’énergie évidente, elle a une vertu essentielle : c’est une source abondante d’hydrogène, l’élément le plus vanté comme le carburant vert de demain. »
Le travail décrit dans *New Scientist* n’était pas ridicule — en fait, il était question d’une voiture utilisant le bore comme carburant, avec une réaction bore/eau comme l’une des premières étapes de la réaction chimique. Pourquoi *New Scientist* a-t-il ressenti le besoin de réécrire cette histoire pour faire croire que c’est l’eau, le carburant ? L’eau n’est pas un carburant. Ça ne l’a jamais été, et ça ne le sera jamais. Elle est déjà brûlée ! La première loi de la thermodynamique dit que vous ne pouvez pas avoir de l’énergie à partir de rien ; vous ne pouvez que convertir l’énergie d’une forme à une autre. Dans n’importe quel moteur, l’énergie doit venir de quelque part. Fox News a d’ailleurs colporté une histoire encore plus absurde [2fzt3].
- 5 *le changement climatique est une menace mondiale bien plus grande que le terrorisme international*. Sir David King, conseiller scientifique en chef du gouvernement du Royaume-Uni, janvier 2004 [26e8z]
- *la glorification des voyages* — une allusion à l’infraction de « glorification » définie dans la loi anti-terroriste du Royaume-Uni, entrée en vigueur le 13 avril 2006. [ykhayj]
- *Figures 1.2*. Cette figure montre la production de pétrole brut y compris les condensats, le gaz naturel liquéfié et autres liquides, et les gains du raffinage. Sources : EIA, et la revue statistique de l’énergie mondiale de BP (*BP statistical review of world energy*).
- 7 *Dans les faits, le premier moteur à vapeur jamais construit le fut en 1698*. Pour être tout à fait honnête, c’est Héron d’Alexandrie qui fit la première description d’un moteur à vapeur. Mais comme son moteur n’a pas fait beaucoup d’émules durant les 1 600 ans qui ont suivi, j’ai jugé plus prudent de qualifier l’invention de Savery datant de 1698 de premier moteur à vapeur jamais construit.

- *Figures 1.4 et 1.7 : Graphique de la concentration de dioxyde de carbone.* Les données sont compilées à partir de Keeling et Whorf (2005) (mesures couvrant la période 1958–2004) ; Neftel et al. (1994) (1734–1983) ; Etheridge et al. (1998) (1000–1978) ; Siegenthaler et al. (2005) (950–1888) ; et Indermuhle et al. (1999) (11 000 à 450 ans avant présent). Ce graphique, soit dit en passant, ne doit pas être confondu avec le « diagramme en crosse de hockey », qui montre l'histoire des températures mondiales. Les lecteurs attentifs auront remarqué que l'argumentaire du changement climatique que j'ai présenté ne fait aucune mention des températures *passées*.

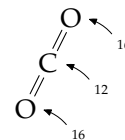
Figures 1.5–1.7 : Production de charbon Les chiffres proviennent de Jevons (1866), Malanima (2006), Netherlands Environmental Assessment Agency (2006), National Bureau of Economic Research (2001), Hatcher (1993), Flinn et Stoker (1984), Church et al. (1986), Supple (1987), Ashworth et Pegg (1986).

Jevons a été le premier auteur du « pic pétrolier » (*peak oil*). En 1865, il a estimé les réserves de charbon faciles d'accès, et, observant l'historique de croissance exponentielle de la consommation, a prédit la fin de la croissance exponentielle, et la fin de la domination britannique sur l'industrie mondiale. « Nous ne pourrions pas maintenir longtemps notre rythme actuel d'augmentation de la consommation. [...] Le frein de notre progrès ne pourra que devenir perceptible dans le siècle qui vient. [...] la conclusion est incontournable : notre croissance heureuse actuelle ne durera qu'un temps limité. » Jevons a eu raison : durant les cent ans qui ont suivi, la production britannique de charbon a effectivement atteint un pic, et il y a eu deux guerres mondiales.

- 9 *Dominic Lawson, chroniqueur dans The Independent.* Ma citation est adaptée de la chronique de Dominic Lawson dans *The Independent*, le 8 juin 2007. Ce n'est pas une citation mot pour mot : je l'ai modifiée pour la rendre plus courte, mais j'ai veillé à ne corriger aucune de ses erreurs. *Les trois nombres qu'il mentionne sont tous incorrects.* Voici les raisons pour lesquelles il s'est planté. Tout d'abord, il parle de « dioxyde de carbone », mais les chiffres qu'il donne concernent le carbone : le fait de brûler des combustibles fossiles envoie 26 gigatonnes de CO₂ par an dans l'atmosphère (et non pas 7 gigatonnes). C'est une erreur courante. Ensuite, il prétend que les océans envoient 36 000 gigatonnes de carbone par an dans l'atmosphère. Cette erreur-là est bien plus grave : 36 000 gigatonnes, c'est la *quantité totale* de carbone présente dans l'océan ! Le *flux* annuel est beaucoup plus faible — environ 90 gigatonnes de carbone par an (330 Gt CO₂/an), selon les schémas standard du cycle du carbone [16y5g] (Il me semble que ces 90 Gt C/an correspondent en fait au flux théorique estimé si la concentration de CO₂ dans l'atmosphère se retrouvait soudainement réduite à zéro.) De même son flux de « 1 900 gigatonnes » de la biosphère à l'atmosphère est erroné. Le chiffre exact selon les diagrammes standard est d'environ 120 gigatonnes de carbone par an (440 Gt CO₂/an).

Soit dit en passant, la hausse observée de la concentration en CO₂ est en assez bon accord avec ce que vous attendriez si vous supposiez que la plupart des émissions de carbone de l'homme restent dans l'atmosphère. Entre 1715 et 2004, environ 1 160 Gt CO₂ ont été rejetées dans l'atmosphère par la consommation de combustibles fossiles et la production de ciment (Marland et al., 2007). Si tout ce CO₂ était resté dans l'atmosphère, la concentration aurait augmenté de 160 ppm (passant de 280 à 440 ppm). La hausse réelle a été d'environ 100 ppm (de 275 à 377 ppm). Ainsi, environ 60 % de ce qui a été émis est maintenant dans l'atmosphère.

- 11 *Le dioxyde de carbone a un effet réchauffant.* Le débat sur-passionnel à ce sujet devient assez lassant, n'est-ce pas ? « La question est réglée au niveau scientifique. » « Non, elle ne l'est pas ! » « Si, elle l'est ! » Je pense que la chose la plus utile que je puisse faire ici serait d'orienter les lecteurs qui souhaiteraient un peu de calme au sein de ce concert de hurlements, vers un bref rapport rédigé par Charney et al. (1979). Ce qui donne du poids aux conclusions de ce rapport, c'est qu'il a été commandité par la *National Academy of Sciences* (l'équivalent aux États-Unis de la *Royal Society* du Royaume-Uni, ou de l'Académie des Sciences française), qui a sélectionné ses auteurs sur la base de leur expertise, en leur demandant de « s'attacher à respecter un équilibre approprié ». Le groupe d'études a été convoqué « sous les



La masse d'une molécule de CO₂ et celle d'un atome de carbone sont dans un rapport 44 / 12 parce que l'atome de carbone pèse 12 unités et chacun des deux atomes d'oxygène pèsent 16 unités.
12 + 16 + 16 = 44.

auspices du *Climate Research Board* du *National Research Council*, afin d'évaluer sur quelles fondements scientifiques on [pouvait] prédire de possibles changements climatiques à venir résultant des rejets humains de dioxyde de carbone dans l'atmosphère ». Plus précisément, on leur a demandé « d'identifier les principes fondamentaux sur lesquels repose notre compréhension actuelle de la question, d'évaluer de manière quantitative la pertinence et les incertitudes de nos connaissances sur ces facteurs et processus, et de résumer en termes concis et objectifs l'état actuel de notre compréhension de la question du dioxyde de carbone et du climat, à l'attention des décideurs ».

Le rapport ne fait que 33 pages, il est en téléchargement libre [5qfkw], et je ne peux qu'en recommander la lecture. Il présente de manière tout à fait claire quels sont les éléments scientifiques qui étaient déjà bien établis en 1979, et quels sont les éléments pour lesquels il y avait encore des incertitudes.

Voici les principaux points que j'ai retenus de ce rapport. Tout d'abord, doubler la concentration atmosphérique en CO_2 modifierait l'apport net en chaleur de la troposphère, des océans et des terres d'une puissance moyenne par unité de surface d'environ 4 W/m^2 , en supposant que toutes les autres propriétés de l'atmosphère restent inchangées. Cet apport de chaleur peut être comparé à la puissance moyenne absorbée par l'atmosphère, les terres et les océans, qui est de 238 W/m^2 . Autrement dit, doubler les concentrations de CO_2 aurait un effet de réchauffement équivalant à l'augmentation de l'intensité du Soleil de $4/238 = 1,7 \%$. Ensuite, les conséquences de ce réchauffement dû au CO_2 sont difficiles à prévoir, compte tenu de la complexité du système océan/atmosphère, mais les auteurs prédisaient une élévation de température à la surface du globe comprise entre 2°C et $3,5^\circ\text{C}$ avec une augmentation plus importante sous les hautes latitudes. Enfin, les auteurs résument : « malgré nos efforts, nous n'avons pu trouver aucun effet physique négligé ou sous-estimé qui pourrait réduire à proportion négligeable, voire inverser l'estimation actuelle d'un réchauffement de la planète du fait d'un doublement du CO_2 atmosphérique ». Ils préviennent du fait que, à cause de l'océan, « le système climatique planétaire possède une très grande et très lourde inertie », et qu'il est fort possible que le réchauffement se produise suffisamment lentement pour qu'il soit difficile à détecter dans la décennie à venir. Néanmoins, « le réchauffement finira par se produire, et les changements climatiques régionaux associés [...] pourraient bien être importants ».

L'avant-propos du président du *Climate Research Board*, Verner E. Suomi, en résume les conclusions par sa fameuse cascade de doubles négations : « si le dioxyde de carbone continue d'augmenter, le groupe d'études ne voit aucune raison de douter que des changements climatiques en résulteront et aucune raison de croire que ces changements seront négligeables ».

- 12 *La litanie des conséquences sévères probables, car je suis sûr que vous l'avez déjà entendue.* Voyez [2z2xg7] si ce n'est pas le cas.
- 13 *Répartition des émissions de gaz à effet de serre du monde par région et par pays.* Source des données : Climate Analysis Indicators Tool (CAIT) Version 4.0. (Washington, DC : World Resources Institute, 2007). Les trois premiers chiffres indiquent les totaux nationaux pour les six principaux gaz à effet de serre (CO_2 , CH_4 , N_2O , PFC, HFC, SF_6), sans tenir compte des contributions du changement d'usage des terres et des forêts. La figure de la page 15 ne montre que les émissions cumulées de CO_2 .
- 16 *Bravo, la Grande-Bretagne ! [...] au tableau des émetteurs historiques par habitant, nous ne nous en laissons remonter que par les États-Unis.* Que le Luxembourg daigne accepter mes plus sincères excuses, lui dont les émissions cumulées par habitant arrivent à dépasser celles des États-Unis ou du Royaume-Uni. Mais il me semblait que le podium devait être réservé aux pays ayant à la fois de grandes émissions par habitant et de grandes émissions totales. En émissions totales, les plus gros émetteurs historiques sont, dans l'ordre, les États-Unis (322 Gt CO_2), la Fédération de Russie (90 Gt CO_2), la Chine (89 Gt CO_2), l'Allemagne (78 Gt CO_2), le Royaume-Uni (62 Gt CO_2), le Japon (43 Gt CO_2), la France (30 Gt CO_2), l'Inde (25 Gt CO_2) et le Canada (24 Gt CO_2). Par habitant, l'ordre est le suivant : Luxembourg, États-Unis, Royaume-Uni, République Tchèque, Belgique, Allemagne, Estonie, Qatar et Canada.
- *Certains pays, y compris la Grande-Bretagne, se sont engagés à réduire d'au moins 60 % leurs émissions de gaz à effet de serre d'ici 2050.* En effet, au moment où j'écris ces lignes, la Grande-Bretagne a pris un engagement encore plus fort de réduction de ses émissions annuelles de 80 % par rapport à 1990.

- *Figure 1.8.* Avec le scénario inférieur, les chances que les températures augmentent de plus de 2°C sont estimées à 9–26 % ; les émissions cumulées de carbone depuis 2007 sont 309 Gt C ; les concentrations de CO₂ atteignent un pic de 410 ppm, la concentration en eq CO₂ atteint un pic à 421 ppm, et en 2100 les concentrations de CO₂ retombent à 355 ppm. Dans le scénario haut, la chance de dépasser 2°C est estimée à 16–43 % ; les émissions de carbone cumulées depuis 2007 sont 415 Gt C ; les concentrations de CO₂ atteignent un pic de 425 ppm, les concentrations eq CO₂ maximales à 435 ppm, et en 2100 les concentrations de CO₂ retombent à 380 ppm. Voir aussi hdr.undp.org/en/reports/global/hdr2007-2008/.
- 17 *il y a aussi de nombreuses autres sources utiles sur Internet.* Je recommande, par exemple (sites anglophones) : la revue statistique de l'énergie mondiale (*Statistical Review of World Energy*) de BP [yyxq2m], la commission du développement durable (*Sustainable Development Commission*) www.sd-commission.org.uk, l'association danoise de l'énergie éolienne (*Danish Wind Industry Association*) www.windpower.org, les Écologistes pour le nucléaire (*Environmentalists For Nuclear Energy*) www.ecolo.org, le département de l'énergie éolienne (*Wind Energy Department*) de l'université de Risø www.risoe.dk/vea, le DEFRA www.defra.gov.uk/environment/statistics, en particulier le livre *Avoiding Dangerous Climate Change* [dzcq], le Pembina Institute www.pembina.org/publications.asp, et le DTI (aujourd'hui connu sous le nom de BERR) www.dti.gov.uk/publications/.
- 19 *Affirmations d'ordre factuel, affirmations d'ordre éthique.* On appelle aussi les affirmations d'ordre éthique des « affirmations normatives » ou des « jugements de valeur », et les affirmations d'ordre factuel des « affirmations positives ». Les affirmations d'ordre éthique contiennent généralement des verbes comme « devoir », « pouvoir » conjugués au conditionnel, ou bien des adjectifs tels que « juste », « injuste », « bien », « mal », « bon » ou « mauvais ». Pour approfondir le sujet, lire Dessler et Parson (2006).
- 20 *Gordon Brown.* Le 10 septembre 2005, Gordon Brown a déclaré que le prix élevé du carburant constituait un risque significatif pour l'économie européenne et la croissance mondiale, et il a exhorté les pays de l'OPEP à augmenter leur production de pétrole. Six mois plus tard, il déclarait à nouveau : « nous avons besoin ... de plus de production, de plus de forages, de plus d'investissement, notamment dans l'industrie pétrochimique » (22 avril 2006) [y98ys5]. Permettez-moi de tempérer cette critique de Gordon Brown en faisant l'éloge de l'une des initiatives qu'il a prises plus récemment, à savoir la promotion des véhicules électriques et hybrides rechargeables. Comme vous le verrez plus loin, l'une des conclusions de ce livre est que l'électrification de l'essentiel des transports représente une bonne part de la solution pour se débarrasser des combustibles fossiles.

2 Le bilan

La nature ne peut pas être dupée.

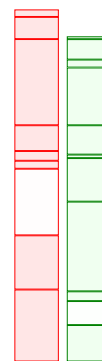
Richard Feynman

Parlons de la consommation et de la production d'énergie. Aujourd'hui, l'essentiel de l'énergie consommée par les pays développés est produite à partir de combustibles fossiles, ce qui n'est pas durable. La question de savoir combien de temps exactement nous pourrions vivre avec les combustibles fossiles serait intéressante, mais ce n'est pas celle que nous allons aborder dans ce livre. Ce que je veux savoir, c'est *comment peut-on vivre sans combustibles fossiles ?*

Pour cela, nous allons créer deux piles. À gauche, la pile rouge, où nous allons comptabiliser notre consommation d'énergie ; et à droite, la pile verte, où nous comptabiliserons la production d'énergie durable. Nous bâtirons ces deux piles progressivement, en y ajoutant des éléments un par un au fur et à mesure que nous en discuterons.

La question posée dans ce livre est « est-il *théoriquement possible* de vivre de façon durable ? » Pour ce faire, nous allons répertorier toutes les sources *théoriques* d'énergie durable et les mettre dans la pile verte de droite.

Dans la pile rouge de gauche, nous allons estimer la consommation d'une « personne-type moyennement riche ». Je vous encourage à estimer votre *propre* consommation, et créer votre propre pile personnalisée à gauche. Plus tard, nous aborderons la consommation d'énergie *moyenne* des Européens et des Américains.



CONSUMMATION PRODUCTION

Parmi les formes-clés de consommation de la pile rouge à gauche, on trouve :

- les transports
 - les voitures, les avions, le fret
- le chauffage et le refroidissement
- l'éclairage
- les appareils électroniques et autres gadgets électriques
- la nourriture
- la fabrication de biens manufacturés

Dans la pile verte de production durable à droite, nos principales catégories vont être :

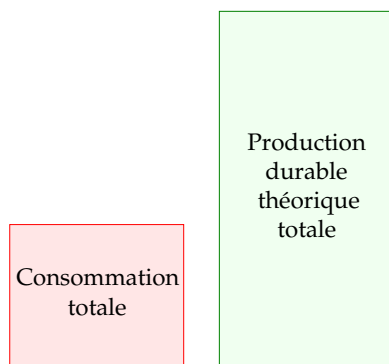
- l'éolien
- le solaire
 - le photovoltaïque, le solaire thermique, la biomasse
- l'hydroélectricité
- l'énergie des vagues
- le marémoteur
- la géothermie
- le nucléaire ? (avec un point d'interrogation, car que le nucléaire puisse être vraiment compté comme « durable » n'est pas clair)

Comme nous faisons une estimation de notre consommation d'énergie pour le chauffage, le transport, l'industrie, ... notre objectif n'est pas seulement de déterminer les chiffres de la pile de gauche de notre bilan, mais aussi de comprendre de quoi chaque chiffre dépend, et dans quelle mesure on peut le modifier.

Dans la pile verte de droite, nous allons comptabiliser les estimations de la production d'énergie durable au Royaume-Uni. Cela nous permettra de répondre à la question : « le Royaume-Uni peut-il théoriquement vivre en se reposant uniquement sur ses propres énergies renouvelables ? »

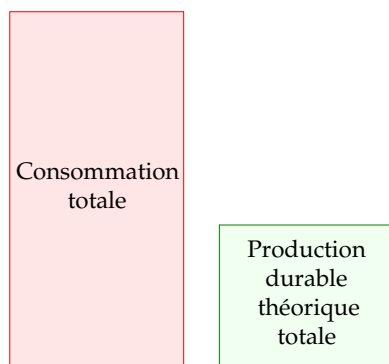
Savoir si les sources d'énergie durable de la pile de droite sont *économiquement* viables est une question importante, mais nous allons la laisser de côté pour l'instant : occupons-nous tout d'abord de chiffrer les deux piles. Parfois, les gens se focalisent tellement sur la faisabilité économique qu'ils en oublient d'avoir une vue d'ensemble de la question. Par exemple, certains s'interrogent « le vent est-il moins cher que le nucléaire ? » et oublient de se demander « *combien* y a-t-il de vent ? » ou « combien reste-t-il d'uranium ? »

Il est possible qu'après avoir tout compilé, le résultat ressemble à ceci :



Si nous trouvons que la consommation est beaucoup plus faible que la production d'énergie durable théorique, alors nous pourrions nous dire « bien, *peut-être* nous est-il possible de vivre de manière durable. Regardons attentivement les coûts économiques, sociaux et environnementaux des alternatives durables, et trouvons lesquelles d'entre elles nécessitent le plus de recherche et développement ; et si nous travaillons bien, *peut-être* n'y aura-t-il pas de crise énergétique. »

Si, par contre, le résultat de nos calculs devait ressembler à ceci :



— ce serait une image beaucoup plus sombre. Cette figure dit que « peu importe les aspects économiques de l'énergie durable, puisqu'il n'y a *pas suffisamment* d'énergie durable pour soutenir notre mode de vie actuel : un changement radical est inévitable. »

Énergie et puissance

La plupart des discussions sur la consommation et la production d'énergie sont confuses parce que l'on utilise de nombreuses *unités* différentes pour exprimer l'énergie et la puissance, de « tonnes équivalent-pétrole » (tep) à « térawatts-heures » (TWh) et « exajoules » (EJ). Personne, excepté un spécialiste, ne peut se représenter ce que « un baril de pétrole » ou « un million de BTU » signifie pour un être humain. Dans ce livre, nous allons utiliser un ensemble d'unités compréhensibles par tout le monde.

L'unité d'**énergie** que j'ai choisie est le kilowatt-heure (kWh). Cette quantité est appelée « une unité » sur les factures d'électricité, et en 2010, elle coûte à un usager environ 8 centimes d'euro en France, et 11 au Royaume-Uni. Comme nous le verrons, la plupart de nos préoccupations quotidiennes se rapportent à des quantités d'énergie égales à un faible nombre de kilowatts-heures.

Lorsque nous parlerons de **puissance** (le rythme auquel nous consommons ou nous produisons de l'énergie), l'unité principale sera le kilowatt-heure par jour (kWh/j). Occasionnellement, nous utiliserons également le watt ($40 \text{ W} \simeq 1 \text{ kWh/j}$) et le kilowatt ($1 \text{ kW} = 1\,000 \text{ W} = 24 \text{ kWh/j}$), comme je l'expliquerai ci-après. Le kilowatt-heure par jour est une bonne unité à échelle humaine : la plupart des activités individuelles qui « bouffent » de l'énergie le font au rythme d'un faible nombre de kilowatts-heures par jour.

Par exemple, une ampoule de 40 W qui reste tout le temps allumée consomme **un** kilowatt-heure par jour. Certaines compagnies d'électricité incluent dans leurs factures d'électricité des graphiques indiquant la consommation d'énergie en kilowatts-heures par jour. J'utiliserai la même unité pour toutes les formes d'énergie, et pas seulement pour l'*électricité*.



FIGURE 2.1. Distinguer énergie et puissance. Toutes ces ampoules de 60 W ont une *puissance* de 60 W lorsqu'elles sont allumées ; elles n'ont pas une « énergie » de 60 W. Une ampoule consomme 60 W de *puissance* électrique quand elle est allumée ; elle émet 60 W de *puissance* sous forme de lumière et de chaleur (en l'occurrence, surtout de chaleur).

Pour la consommation d'essence, de gaz, de charbon aussi, j'exprimerai *toujours* ces puissances en kilowatts-heures par jour. Permettez-moi d'être bien clair sur ce point : pour certains, le mot « puissance » ne se rapporte qu'à la consommation d'énergie *électrique*. Mais ce livre concerne *toutes* les formes de consommation et de production d'énergie, et j'utiliserai le mot « puissance » pour chacune d'elles.

Un kilowatt-heure par jour est à peu près la puissance que vous pourriez obtenir d'un domestique. Le nombre de kilowatts-heures par jour que vous consommez équivaut donc au nombre de personnes qui travailleraient pour vous.

Dans le langage courant, on utilise indifféremment les deux termes énergie et puissance, mais dans ce livre, nous respecterons rigoureusement leurs définitions scientifiques. *La puissance est la vitesse à laquelle quelque chose utilise de l'énergie.*

Une bonne façon d'expliquer la notion d'énergie et de puissance est de procéder par analogie avec l'eau et le débit des robinets. Si vous voulez boire de l'eau, vous en voudrez un certain *volume* — un litre, peut-être (si vous avez soif). Lorsque vous ouvrez le robinet, vous créez un courant d'eau avec un certain *débit* — un litre par minute, disons, si on laisse couler à un faible débit, ou 10 litres par minute si le robinet est ouvert en grand. Vous pouvez obtenir le même volume (un litre) en une minute avec un filet d'eau, ou en un dixième de minute avec un robinet grand ouvert. Le *volume* délivré dans une période de temps donné est égal au *débit* multiplié par le *temps* :

$$\text{volume} = \text{débit} \times \text{temps}.$$

On dit que le *débit* est la *vitesse* avec laquelle le *volume* est délivré. Si vous connaissez le volume délivré en un certain temps, vous obtenez le débit en divisant le volume par le temps :

$$\text{débit} = \frac{\text{volume}}{\text{temps}}.$$

Faisons le lien avec l'énergie et la puissance. L'énergie, c'est comme le volume d'eau, et la puissance comme le débit de l'eau. Par exemple, lorsqu'on allume un grille-pain, il commencera à consommer de l'électricité avec une *puissance* d'un kilowatt. Il continuera à consommer un kilowatt jusqu'à ce qu'on l'éteigne. En d'autres termes, le grille-pain (s'il reste allumé en permanence) consomme un kilowatt-heure (kWh) d'énergie par heure, soit 24 kilowatts-heures par jour. Plus le grille-pain sera allumé longtemps, plus il consommera d'énergie. Vous pouvez calculer l'énergie utilisée par une activité particulière en multipliant la puissance par la durée :

$$\text{énergie} = \text{puissance} \times \text{temps}.$$

L'unité internationale standard utilisée pour exprimer l'énergie, c'est le joule. Malheureusement, dans notre cas, le joule est une unité trop petite

le <i>volume</i> s'exprime en litres	le <i>débit</i> s'exprime en litres par minute

l' <i>énergie</i> s'exprime en kWh	la <i>puissance</i> s'exprime en kWh par jour

l' <i>énergie</i> s'exprime en kWh ou MJ	la <i>puissance</i> s'exprime en kWh par jour ou kW ou W (watts) ou MW (mégawatts) ou GW (gigawatts) ou TW (térawatts)

pour qu'on puisse vraiment l'utiliser. Le kilowatt-heure est égal à 3,6 millions de joules (3,6 mégajoules).

Les puissances sont quelque chose de si utile et si important qu'elles possèdent quelque chose que les débits d'eau n'ont pas : elles ont leur propre unité. Lorsque l'on parle de débit, on peut le mesurer en « litres par minute », en « gallons par heure », ou en « mètres cube par seconde » ; la dénomination de ces unités rend explicite le fait que le débit est « un volume par unité de temps ». Une puissance d'un *joule par seconde* est appelée *un watt*. 1 000 joules par seconde correspondent à un kilowatt. Soyons bien clair sur la terminologie : le grille-pain consomme un kilowatt. Il ne consomme pas « un kilowatt par seconde ». Car le « par seconde » est déjà intégré dans la définition du kilowatt : un kilowatt correspond à « un kilojoule par seconde ». De même, nous dirons que « une centrale nucléaire produit un gigawatt ». A ce propos, un gigawatt, c'est un milliard de watts, un million de kilowatts, ou encore 1 000 mégawatts. Donc, un gigawatt, cela correspond à un million de grille-pains. L'abréviation de gigawatt s'écrit tout en majuscules « GW », en reprenant le « g » et le « w » de « gigawatt ».

Je vous en prie, ne dites jamais, jamais « un kilowatt par seconde », « un kilowatt par heure », ou « un kilowatt par jour » ; aucune de ces dénominations ne correspond à une unité de mesure de puissance. Le besoin que les gens ont à exprimer « par quelque chose » lorsqu'ils parlent de la consommation de leur grille-pain est l'une des raisons pour lesquelles j'ai décidé d'utiliser le « kilowatt-heure par jour » comme unité de puissance. Je suis désolé si c'est un peu lourd à dire et à écrire.

Une dernière précision : si je dis que « l'on a consommé un gigawatt-heure d'énergie », je parle simplement de *la quantité* d'énergie que l'on a consommée, et non pas *du rythme* auquel on l'a consommée. Quand on parle d'un gigawatt-heure, cela *ne signifie pas* que l'énergie a été consommée *en une heure*. Vous pouvez consommer un gigawatt-heure d'énergie en faisant fonctionner un million de grille-pains pendant une heure, ou en utilisant 1 000 grille-pains pendant 1 000 heures.

Comme je l'ai dit précédemment, je vais indiquer les puissances en kWh/j *par personne*. L'une des raisons pour lesquelles je préfère utiliser cette unité toute personnelle est que grâce à cela, comparer le Royaume-Uni à d'autres pays ou d'autres régions devient beaucoup plus facile. Imaginons par exemple que l'on parle de l'incinération des déchets, et que l'on apprenne que l'incinération des déchets produit au Royaume-Uni une puissance de 7 TWh par an, et au Danemark, 10 TWh par an. Peut-on en déduire que le Danemark incinère « plus » de déchets que le Royaume-Uni ? Même si la puissance totale produite dans chaque pays à partir des déchets est sans doute une information digne d'intérêt, je pense que ce qui est vraiment intéressant, c'est la puissance produite *par personne*. (En l'occurrence : pour le Danemark, cela fait 5,5 kWh/j par personne, et pour le Royaume-Uni, 0,3 kWh/j par personne. Donc les Danois incinèrent en-

1 TWh (un térawatt-heure) est égal à un milliard de kWh.

viron 13 fois plus de déchets que les Britanniques.) Pour économiser de l'encre, je remplacerai parfois « par personne » par « /pers ». En exprimant dès le départ chaque chose par personne, nous nous retrouverons avec un livre plus facile à transporter, et qui, je l'espère, sera utile pour discuter de l'énergie durable du monde entier.

Détails complexes

L'énergie ne se conserve-t-elle pas ? Nous parlons de « consommer » de l'énergie, mais une des lois de la nature ne dit-elle pas que l'énergie ne peut être créée ou détruite ?

Oui, je deviens imprécis. En fait, ce dont parle vraiment ce livre, c'est d'*entropie* – une chose bien plus délicate à expliquer. Quand on « consomme la totalité » d'un kilojoule d'énergie, ce qu'on fait en réalité, c'est prendre un kilojoule d'énergie sous une forme de *faible entropie* (par exemple, de l'électricité), et le *convertir* en une quantité exactement égale d'énergie sous une autre forme, possédant généralement une entropie beaucoup plus élevée (l'air chaud ou l'eau chaude par exemple). Une fois que l'on a « consommé » cette énergie, il en reste encore, mais ce qu'il reste ne peut pas normalement être « utilisé » et « réutilisé », car seule de l'énergie de *faible entropie* nous est « utile ». Parfois, on distingue les différentes qualités d'énergie par l'ajout d'une mention aux unités : un kWh(e), c'est un kilowatt-heure d'énergie électrique — l'énergie de qualité la plus haute. Un kWh(th), c'est un kilowatt-heure d'énergie thermique — par exemple, l'énergie dans dix litres d'eau bouillante. L'énergie des choses à haute température est plus utile (entropie plus faible) que l'énergie des choses tièdes. L'énergie chimique constitue une troisième forme d'énergie ; tout comme l'électricité, elle est de haute qualité.

Même s'il est approximatif, parler d'énergie plutôt que d'entropie est un raccourci bien pratique. C'est pour cela que, la plupart du temps dans ce livre, nous l'adopterons. Néanmoins, ici ou là, il nous faudra se ressaisir et être plus précis, par exemple lorsque nous parlerons de la réfrigération, des centrales électriques, des pompes à chaleur ou de l'énergie géothermique.

Les différentes formes d'énergie, comme l'énergie chimique qui alimente les voitures à moteur à essence ou l'électricité que produisent les éoliennes, sont-elles vraiment comparables ? Ne seriez-vous pas plutôt en train de mélanger des torchons et des serviettes ?

Quand je compare l'énergie consommée avec l'énergie qu'on peut théoriquement produire, je ne veux pas dire que toutes les formes d'énergie se valent ou qu'elles sont interchangeables. L'énergie électrique produite par une éolienne n'est d'aucune utilité pour un moteur à essence, et l'essence ne sert à rien pour faire fonctionner une télévision. En principe, l'énergie peut être convertie d'une forme en une autre, même si, en pratique,

la conversion de l'une à l'autre entraîne toujours des pertes. Par exemple, les centrales brûlant des combustibles fossiles, gourmandes en *énergie chimique*, produisent de l'*électricité* (avec un rendement d'environ 40 %). Et les usines d'aluminium, gourmandes en *énergie électrique*, créent un produit à haute teneur en *énergie chimique* — l'aluminium (avec un rendement d'environ 30 %).

Dans un certain nombre de documents qui parlent de production et de consommation d'énergie, les différentes formes d'énergie sont indiquées dans la même unité, mais des facteurs multiplicatifs sont introduits pour indiquer, par exemple, que l'énergie électrique produite par l'hydroélectricité est 2,5 fois plus importante que l'énergie chimique contenue dans le pétrole. Cette surcote de l'énergie électrique peut être justifiée en disant : « 1 kWh d'électricité équivaut à 2,5 kWh de pétrole, parce que si nous alimentons en pétrole une centrale électrique standard, celle-ci ne fournira que 40 % des 2,5 kWh, soit 1 kWh d'électricité. »

Toutefois, dans ce livre, j'utiliserai souvent un taux de conversion de 1 pour 1 pour comparer les différentes formes d'énergie. Car 2,5 kWh de pétrole ne sont *pas toujours* inéluctablement équivalents à 1 kWh d'électricité : cette relation d'équivalence entre les énergies est juste révélatrice d'un monde où l'on utilise le pétrole pour produire de l'électricité. Certes, la conversion de l'énergie chimique en énergie électrique se fait effectivement avec ce rendement particulièrement inefficace. Mais on peut aussi convertir l'énergie électrique en énergie chimique. Et dans un monde alternatif (peut-être pas si éloigné) qui disposerait d'une électricité relativement abondante et de peu de pétrole, on pourrait utiliser l'électricité pour fabriquer des carburants liquides. Dans ce monde-là, on n'utiliserait certainement pas le même taux de conversion — chaque kWh d'essence pourrait alors nous coûter quelque chose comme 3 kWh d'électricité ! Je pense donc que la manière intemporelle et scientifique de résumer et de comparer les énergies est de retenir que 1 kWh d'énergie chimique est équivalent à 1 kWh d'électricité. Mon choix d'utiliser ce taux de conversion de 1 pour 1 signifie que certains de mes calculs seront un peu différents des calculs faits par d'autres personnes. (Par exemple, dans le *Statistical Review of World Energy* de BP, 1 kWh d'électricité équivaut à $100/38 \simeq 2,6$ kWh de pétrole ; de son côté, le *Digest of UK Energy Statistics* utilise le même taux de conversion de 1 pour 1 que moi). Et j'insiste encore une fois : par ce choix, je ne suggère pas que l'on peut convertir l'énergie directement d'une forme à l'autre. On perd toujours une partie de l'énergie en transformant de l'énergie chimique en énergie électrique (et inversement).

Physique et équations

Mon but tout au long de ce livre n'est pas seulement de travailler sur des chiffres qui indiquent notre consommation actuelle d'énergie et la production d'énergie durable théoriquement possible ; il est aussi de

préciser *de quoi ces chiffres dépendent*. Comprendre de quoi ces chiffres dépendent est essentiel si on veut pouvoir choisir des politiques judicieuses qui modifieront n'importe lequel d'entre eux. C'est à la condition expresse de comprendre la physique qui se trouve derrière la consommation et la production d'énergie que nous pourrions commenter sans dire de bêtises des affirmations comme « les voitures gaspillent 99 % de l'énergie qu'elles consomment ; on pourrait revoir leur conception pour qu'elles consomment 100 fois moins ». Cette affirmation est-elle exacte ? Pour expliquer la réponse à cette question, il va me falloir utiliser des équations comme celle-ci :

$$\text{énergie cinétique} = \frac{1}{2}mv^2.$$

Je reconnais toutefois que pour de nombreux lecteurs, ces formules ressemblent à du chinois. Donc, je vous promets que *je vais mettre de côté toutes ces expressions qui semblent absconses et compliquées, et je vais les réserver aux chapitres techniques à la fin du livre*. Tout lecteur ayant fait des études secondaires de mathématiques, de physique ou de chimie, pourra profiter de la lecture de ces chapitres techniques. Le fil conducteur de ce livre (de la page 2 à la page 296) est destiné à être accessible à tous ceux qui savent faire des additions, des multiplications et des divisions. Il est particulièrement destiné à nos chers représentants élus et non élus et à nos parlementaires.

Un dernier point, avant de commencer : je ne connais pas tout sur l'énergie. Je n'ai pas toutes les réponses, et la discussion est ouverte sur les chiffres que je propose ; ils peuvent être revus et corrigés. (Et je m'attends d'ailleurs à des corrections, que je publierai sur le site Web du livre.) La seule chose dont je sois *absolument* sûr, c'est que les réponses à nos questions sur l'énergie durable impliqueront des *chiffres* ; toute discussion saine sur l'énergie durable exige des chiffres. Ce livre les contient, et il montre comment travailler avec. J'espère que cela vous plaira !

Notes et bibliographie

Page n°

- 29 *Le « par seconde » est déjà intégré à la définition du kilowatt*. Il n'y a pas que le watt qui inclue le « par unité de temps » dans sa définition. D'autres unités l'incluent aussi, comme par exemple : le nœud — « la vitesse de notre bateau est de dix nœuds ! » (un nœud est un mille nautique *par* heure) ; le hertz — « je peux entendre un bourdonnement de 50 hertz » (un hertz est une fréquence d'un cycle *par* seconde) ; l'ampère — « le fusible fond lorsque le courant est supérieur à 13 ampères » (*pas* 13 ampères *par* seconde) ; la puissance — « ce moteur puant délivre 50 chevaux » (*pas* 50 chevaux *par* seconde, ni 50 chevaux *par* heure, ni 50 chevaux *par* jour : juste 50 chevaux).
- *Je vous en prie, ne dites jamais, jamais « un kilowatt par seconde »*. Il y a quelques rares exceptions à cette règle. Si l'on parle d'une croissance de la demande d'énergie, nous pourrions dire « la demande britannique croît d'un gigawatt par an ». Dans le chapitre 26, lorsque je parle des fluctuations de la production d'énergie éolienne, je dis « un matin, la puissance délivrée par les éoliennes irlandaises a diminué au rythme de 84 MW par heure ». Prenez garde ! Juste une syllabe accidentelle peut apporter la confusion : par exemple, votre compteur électrique indique des kilowatts-heures (kWh) », et *non* des « kilowatts par heure ».

J’ai inclus à la page 429 un tableau pour vous aider à traduire en kWh par jour et par personne les autres principales unités de puissance dont nous parlerons dans le reste de ce livre.

3 Voitures

Commençons cette série de chapitres dédiés à la consommation par cette icône de la civilisation moderne : la voiture avec un seul occupant.

Combien de puissance consomme un automobiliste régulier ? Une fois les taux de conversion connus, c'est de l'arithmétique toute simple :

$$\text{énergie utilisée par jour} = \frac{\text{distance parcourue par jour}}{\text{distance par unité de volume de carburant}} \times \text{énergie par unité de volume de carburant.}$$

Comme **distance parcourue par jour**, prenons 50 km.

Comme **distance par unité de volume de carburant**, également connue comme la consommation de la voiture, prenons une valeur moyenne de 8,5 litres/100 km (j'ai trouvé cette consommation sur une publicité pour une voiture familiale) :

$$100 \text{ km} / 8,5 \text{ litres} \simeq 12 \text{ km/litre.}$$

(Le symbole « $\simeq$ » signifie « à peu près égal à ».)

Qu'en est-il de l'**énergie par unité de volume de carburant** (également appelée la **valeur calorifique** ou la **densité énergétique**) ? Au lieu de la chercher directement dans des livres, ça peut être amusant d'essayer d'en faire une estimation en réfléchissant deux secondes. Les carburants automobiles (essence ou gazole, peu importe) sont tous des hydrocarbures ; et des hydrocarbures, on peut aussi en trouver sur notre table au petit-déjeuner, avec, sur le côté de leur emballage, leur valeur calorifique : environ 8 kWh par kg (figure 3.2). Nous avons estimé la consommation de la voiture en kilomètres par unité de *volume* de carburant ; il nous faut maintenant exprimer la valeur calorifique comme une énergie par unité de *volume*. Pour convertir les « 8 kWh par kg » de notre carburant (une énergie par unité de *masse*) en une énergie par unité de volume, nous avons besoin de connaître la densité du carburant. Quelle est la densité du beurre ? Eh bien, le beurre flotte tout juste sur l'eau, tout comme les fuites de carburant, donc sa densité doit être légèrement inférieure à celle de l'eau, qui est de 1 kg par litre. Si l'on suppose une densité de 0,8 kg par litre, on obtient alors une valeur calorifique de :

$$8 \text{ kWh par kg} \times 0,8 \text{ kg par litre} \simeq 7 \text{ kWh par litre.}$$

Plutôt que de poursuivre délibérément avec des estimations peu précises, passons maintenant à la valeur réelle, pour l'essence, qui est de 10 kWh



FIGURE 3.1. Voitures. Une BMW rouge « écrasée » par un vaisseau spatial venu d'une autre planète.



FIGURE 3.2. Vous voulez savoir combien il y a d'énergie dans le carburant des voitures ? C'est facile : regardez l'emballage d'un paquet de beurre ou de margarine. La valeur calorifique est de 3 000 kJ pour 100 g, soit environ 8 kWh par kg.

par litre.

$$\begin{aligned}
 \frac{\text{énergie consommée}}{\text{par jour}} &= \frac{\text{distance parcourue}}{\text{par jour}} \times \frac{\text{énergie par unité de}}{\text{volume de carburant}} \\
 &= \frac{50 \text{ km/jour}}{12 \text{ km/litre}} \times 10 \text{ kWh/litre} \\
 &\simeq 40 \text{ kWh/jour.}
 \end{aligned}$$

Bravo ! Nous avons fait notre première estimation de consommation. J'ai placé cette estimation dans la pile de gauche de la figure 3.3. La hauteur de la boîte rouge représente 40 kWh par jour et par personne.

Cette estimation vaut pour un automobiliste standard conduisant une voiture standard aujourd'hui. Dans les prochains chapitres, nous parlerons de la consommation *moyenne* de tout le monde en Grande-Bretagne, en tenant compte du fait que tout le monde ne se déplace pas en voiture. Nous discuterons aussi, dans la seconde partie de ce livre, de ce que la consommation *pourrait* devenir, si l'on faisait appel à d'autres technologies, comme les voitures électriques.

Pourquoi la voiture consomme-t-elle 8,5 litres sur 100 km ? Où va cette énergie ? Est-il possible de fabriquer des voitures qui pourraient parcourir 1 200 kilomètres avec un seul litre ? Si l'on a envie d'essayer de réduire la consommation des voitures, il faut comprendre les lois de la physique qui la régissent. Toutes ces questions trouvent leur réponse dans le chapitre technique A (page 300), qui explique, sous forme de dessin, la théorie de la consommation des voitures. Je vous recommande la lecture des chapitres techniques si les formules du genre $\frac{1}{2}mv^2$ ne vous donnent pas trop mal à la tête.

Conclusion du chapitre 3 : un automobiliste standard consomme environ 40 kWh par jour. A présent, il nous faut poursuivre en parlant de la pile de droite — la production d'énergie durable — afin d'avoir des éléments comparables.

Interrogations

Et le coût en énergie pour produire le carburant de la voiture ?

Bonne question ! Quand j'estime l'énergie consommée par une activité donnée, j'ai tendance à choisir un cadre limité autour de cette activité. Ce choix facilite l'estimation, mais je reconnais que c'est une bonne idée d'essayer d'estimer l'impact énergétique global d'une activité. Par exemple, on estime que chaque unité d'essence nécessite un apport de 1,4 unités de pétrole et d'autres combustibles primaires (Treloar et al., 2004).

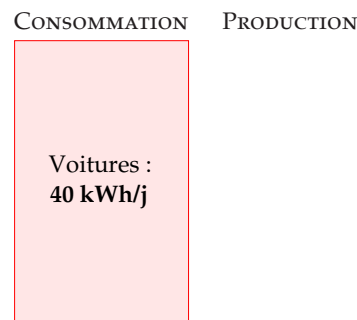


FIGURE 3.3. Conclusion du chapitre 3 : un automobiliste standard consomme à peu près 40 kWh par jour.

Et le coût en énergie pour fabriquer la voiture elle-même ?

En effet, ce coût sort aussi du cadre du calcul que nous avons fait. Nous parlerons de la fabrication de voitures dans le chapitre 15.

Notes et bibliographie

Page n°

- 34
- Comme distance parcourue par jour, prenons 50 km. Cela correspond à 18 000 km par an. A peu près la moitié de la population britannique prend le volant pour aller travailler. La distance totale parcourue en voiture au Royaume-Uni est de 686 milliards de passagers-km par an, ce qui correspond à une « distance moyenne parcourue en voiture par personne » de 30 km par jour. Source : Ministère britannique des Transports [5647rh]. Comme je l'ai dit à la page 25, je cherche à estimer la consommation d'une « personne type moyennement riche » — consommation à laquelle beaucoup de gens aspirent. Certaines personnes conduisent peu. Dans ce chapitre, je tiens à estimer l'énergie consommée par une personne qui choisit de prendre le volant, plutôt que de donner une réponse plus impersonnelle en indiquant la moyenne du Royaume-Uni, qui mélange conducteurs et non-conducteurs. Si je disais « l'utilisation moyenne d'énergie pour la conduite automobile en Grande Bretagne est de 13 kWh/j par personne », je suis sûr que certaines personnes l'interpréteraient de travers en disant : « Je conduis une voiture, donc je suppose que je consomme 13 kWh/j ».
- 34
- ... prenons 8,5 litres/100 km. Ce chiffre représentait la moyenne de consommation des voitures anglaises en 2005 [27jdc5]. Les voitures à essence ont une consommation moyenne de carburant de 9,1 litres/100 km ; les voitures diesel de 7,2 litres/100 km ; les voitures à essence récentes (moins de deux ans) de 8,8 litres/100 km. Source : Ministère britannique des Transports, 2007. Honda, « le constructeur des voitures les plus efficaces d'Amérique », indique que sa flotte de voitures neuves vendues en 2005 affiche un chiffre record de 8,1 litres/100 km [28abpm].
-
- Si l'on suppose une densité de 0,8 kg/L. La densité de l'essence est de 0,737. Celle du gazole est comprise entre 0,820 et 0,950 [nmn41].
- 35
- ... la valeur réelle de 10 kWh par litre. L'ORNL [2hcgdh] fournit les valeurs calorifiques suivantes : gazole, 10,7 kWh/L ; kérosène, 10,4 kWh/L ; essence, 9,7 kWh/L. Si vous regardez de plus près les valeurs calorifiques, vous trouverez des « valeurs calorifiques brutes » et « valeurs calorifiques nettes » (que l'on trouve aussi sous l'appellation « valeurs calorifiques hautes » et « valeurs calorifiques basses »). Celles-ci diffèrent seulement de 6 % pour les carburants, il n'est donc pas essentiel de les distinguer ici, mais permettez-moi quand même une petite explication. La valeur calorifique brute est l'énergie chimique réelle libérée lorsque le combustible est brûlé. Parmi les produits de la combustion, on trouve de l'eau, et dans la plupart des moteurs et des centrales de production d'énergie, une partie de l'énergie libérée s'en va sous forme de chaleur, qui sert à vaporiser cette eau. La valeur calorifique nette

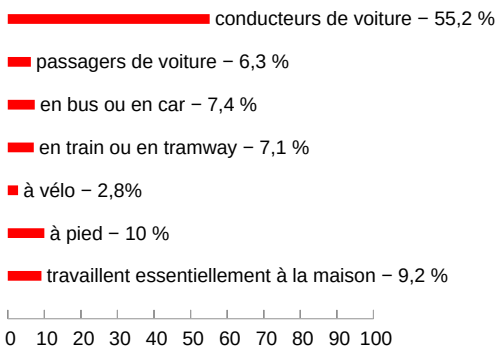


FIGURE 3.4. Comment les Britanniques se rendent au travail (cf. recensement de 2001).

valeur calorifique	
essence	10 kWh par litre
gazole	11 kWh par litre

mesure la quantité d'énergie restante une fois l'énergie de vaporisation mise de côté.

Si on se demande « avec mon mode de vie, combien d'énergie est-ce-que je consomme ? », il convient d'utiliser la valeur calorifique brute. Par contre, la valeur calorifique nette a un intérêt pour l'ingénieur énergétique qui doit décider quel combustible il doit brûler dans sa centrale pour produire de l'énergie. Dans ce livre, j'ai essayé d'utiliser les valeurs calorifiques brutes. Une dernière remarque pour terminer, à l'adresse des rabat-joie pinailleurs qui diront que « le beurre n'est pas un hydrocarbure » : c'est vrai, le beurre n'est pas un hydrocarbure *pur*. Mais dire que le principal constituant du beurre est composé de longues chaînes hydrocarbonées, tout comme le pétrole, c'est une bonne approximation de la réalité. La preuve : cette estimation nous a amenés à moins de 30 % de la réponse correcte. Bienvenue dans le monde de la vulgarisation de la physique.



4 Vent

Le Royaume-Uni possède les plus grandes réserves éoliennes en Europe.

Commission du développement durable

Les parcs éoliens dévasteront la campagne en vain.

James Lovelock

En théorie, combien de puissance pourrait-on produire à partir du vent ?

On peut faire une estimation du potentiel éolien *terrestre* du Royaume-Uni en multipliant la puissance moyenne par unité de surface d'un parc éolien par la surface par personne qui vit dans le pays :

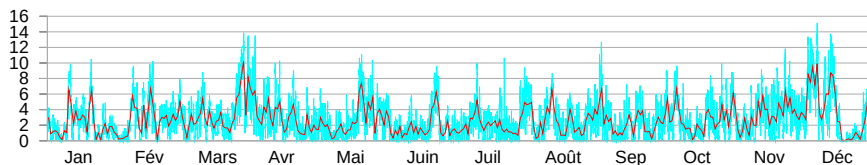


FIGURE 4.1. Vitesse moyenne du vent à Cambridge en mètres par seconde, par jour (ligne rouge), et par demi-heure (ligne bleue) en 2006. Voir aussi la figure 4.5.

puissance par personne =

puissance éolienne par unité de surface $\times$ surface par personne.

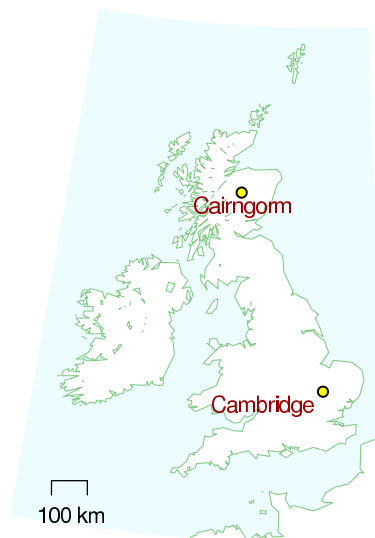
Le chapitre B (page 311) explique comment estimer la puissance par unité de surface d'un parc éolien au Royaume-Uni. Si la vitesse typique du vent est de 6 m/s (22 km/h), la puissance par unité de surface du parc éolien est d'environ 2 W/m^2 .

Pour de nombreux endroits en Grande-Bretagne, ce chiffre de 6 m/s est probablement surestimé. Par exemple, la figure 4.1 indique la vitesse moyenne quotidienne du vent observée à Cambridge durant l'année 2006. La vitesse moyenne quotidienne n'a atteint 6 m/s qu'une trentaine de jours dans l'année — voir la figure 4.5 pour un histogramme plus détaillé. Mais certains lieux ont effectivement des vitesses de vent supérieures à 6 m/s — par exemple au sommet du Cairngorm en Écosse (figure 4.2).

En considérant une densité de la population britannique de 250 personnes par kilomètre carré, soit 4 000 mètres carrés par personne, on constate que l'éolien pourrait générer :

$$2 \text{ W/m}^2 \times 4\,000 \text{ m}^2/\text{personne} = 8\,000 \text{ W par personne,}$$

en supposant qu'un nombre maximum possible d'éoliennes est déployée sur *tout* le territoire, et en supposant que 2 W/m^2 est une valeur correcte pour la puissance par unité de surface. Si on convertit ce résultat dans notre unité de puissance favorite, cela donne 200 kWh/j par personne.



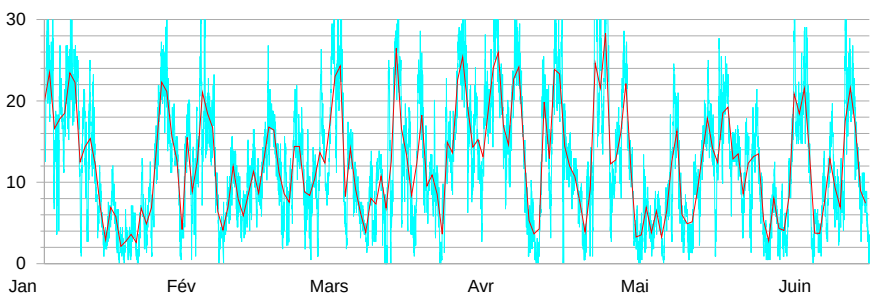


FIGURE 4.2. Vitesse du vent moyenne à Cairngorm en mètres par seconde, durant six mois en 2006.

Soyons réalistes. Quelle fraction du territoire pourrait-on vraiment imaginer couvrir de « moulins à vent » ? 10 %, peut-être ? Si on couvrait les 10 % du territoire les plus venteux de parcs éoliens (produisant 2 W/m^2), on serait capable de fournir **20 kWh/j par personne**, c’est-à-dire la *moitié* de la puissance que consomme une voiture moyenne qui fait 50 km par jour en brûlant des combustibles fossiles.

Les ressources éoliennes terrestres de Grande-Bretagne sont peut-être « énormes ». Mais clairement, elles ne sont pas aussi énormes que notre énorme consommation. Nous parlerons de l’éolien en mer un peu plus loin.

Je tiens à préciser à quel point l’hypothèse que je fais ici est optimiste. Comparons cette estimation du potentiel éolien en Grande-Bretagne à la puissance éolienne actuellement installée dans le monde. La quantité d’éoliennes qu’il faudrait construire pour alimenter le Royaume-Uni avec 20 kWh/j par personne correspond à 50 fois le parc éolien installé au Danemark ; à 7 fois celui installé en Allemagne, et au double du parc éolien mondial.

Ceci étant dit, ne vous méprenez pas. Est-ce que j’ai dit qu’il faut mettre l’éolien aux oubliettes et ne plus construire du tout d’éolienne ? Absolument pas. J’essaie simplement de souligner une vérité factuelle, à savoir que si on veut que l’éolien fasse véritablement la différence, les parcs éoliens devront couvrir une surface vraiment très grande du territoire.

Cette conclusion — le fait que l’apport maximum de l’éolien terrestre a beau être « énorme », il l’est beaucoup moins que notre consommation — est importante. Comparons notre chiffre-clé, la puissance supposée par unité de surface de parc éolien (2 W/m^2) à la valeur observée pour un véritable parc éolien au Royaume-Uni.

Le parc éolien de Whitelee, construit près de Glasgow en Écosse, est constitué de 140 turbines d’une capacité totale *en crête* de 322 MW, et couvre une surface de 55 km^2 . Ce qui fait moins de 6 W/m^2 *en crête*. La puissance moyenne produite est plus faible que la puissance-crête, parce que les pales des éoliennes ne tournent pas tout le temps à leur régime de pointe. Le ratio puissance moyenne sur puissance-crête est appelé « facteur de charge » ou « facteur de capacité » ; il varie d’un site à l’autre, suivant

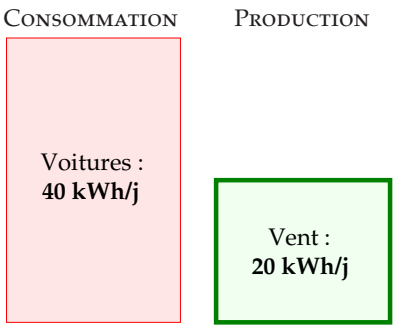


FIGURE 4.3. La conclusion du chapitre 4 : la production maximale théorique des éoliennes terrestres au Royaume-Uni est de 20 kWh par jour et par personne.

PUISSANCE PAR UNITÉ DE SURFACE	
Parcs éoliens (vitesse 6 m/s)	2 W/m ²

TABLEAU 4.4. Rappelons les faits : les parcs éoliens.

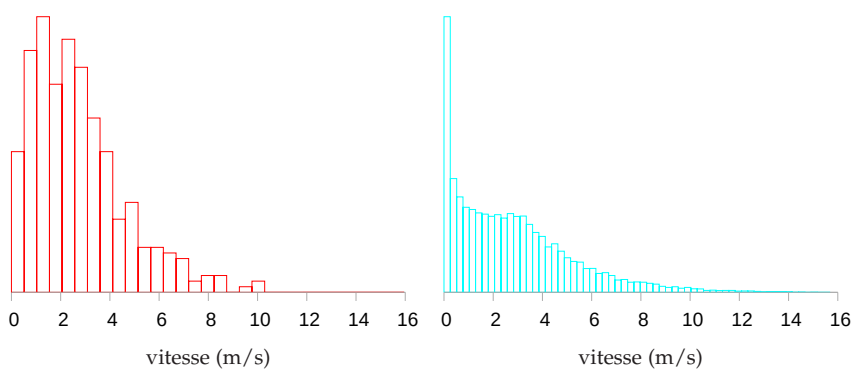


FIGURE 4.5. Histogramme de la vitesse moyenne du vent à Cambridge en mètres par seconde : des moyennes journalières (à gauche), et des moyennes par demi-heure (à droite).

les conditions de vent locales et aussi les choix technologiques faits pour l'éolienne. Pour un bon site disposant de turbines modernes, un facteur de charge typique tourne autour de 30 %. En supposant que le facteur de charge de Whitelee soit de 33 %, alors la puissance moyenne produite par unité de surface couverte est de 2 W/m^2 — exactement la densité de puissance que nous avons trouvée plus haut.

Interrogations

Les pales des éoliennes ne cessent de grandir. Si elles étaient encore plus grandes, est-ce que cela changerait la conclusion de ce chapitre ?

Le chapitre B en donne une explication. Plus elles sont grandes, plus les éoliennes permettent de réaliser des économies d'échelle sur le plan financier. Mais cela n'augmente pas considérablement la puissance totale produite par unité de surface, parce que plus les éoliennes sont grandes, plus il faut les éloigner les unes des autres. En pratique, avec des éoliennes deux fois plus grandes, un parc fournit en gros 30 % de puissance en plus.

La puissance du vent change sans arrêt. Cela réduit pas mal son utilité, non ?

Peut-être. Nous reviendrons sur cette question au chapitre 26, quand nous parlerons de l'intermittence du vent et de diverses solutions pour remédier à ce problème, y compris le stockage d'énergie et la gestion de la demande.

Notes et bibliographie

Page n°

38 *Figure 4.1 et figure 4.5.* Les données de vent de Cambridge sont issues du Groupe Digital Technology, du Computer Laboratory de Cambridge [vxhhj]. La station météo est située sur le toit de l'immeuble Gates, à environ 10 mètres de haut. Normalement, la vitesse du vent à une hauteur de 50 mètres est environ 25 % plus importante. Les données concernant Cairngorm (*figure 4.2*) proviennent du département de physique de l'Université Heriot-Watt [tdvm1].

DENSITÉ DE POPULATION EN GRANDE-BRETAGNE
250 par km ² ↔ 4 000 m ² par personne

TABLEAU 4.6. Rappelons les faits : la densité de population. Voir page 397 pour d'autres densités de population.

- 39 *La quantité d'éoliennes qu'il faudrait construire pour alimenter le Royaume-Uni avec 20 kWh/j par personne correspond à 50 fois le parc éolien installé au Danemark.* En supposant un facteur de charge de 33 %, une puissance moyenne de 20 kWh/j par personne exige une capacité de production installée de 150 GW. Fin 2006, le Danemark possédait une capacité installée de 3,1 GW, l'Allemagne de 20,6 GW, et le monde entier de 74 GW (wwindea.org). Soit dit en passant, le facteur de charge du parc éolien danois était de 22 % en 2006, et la puissance moyenne délivrée était de 3 kWh/j par personne.

5 Avions

Imaginez que vous fassiez tous les ans un voyage intercontinental en avion. Combien ça coûterait d'énergie ?

Un Boeing 747-400 avec 240 000 litres de carburant peut transporter 416 passagers sur environ 14 200 km. La valeur énergétique du kérosène est de 10 kWh par litre (nous l'avons vu au chapitre 3.) Donc, si on le divise de manière égale sur tous les passagers, le coût énergétique d'un aller-retour sur cette distance avec cet avion est de :

$$\frac{2 \times 240\,000 \text{ litres}}{416 \text{ passagers}} \times 10 \text{ kWh/litre} \simeq 12\,000 \text{ kWh par passager.}$$

Si vous faites un voyage comme celui-ci tous les ans, alors votre consommation moyenne d'énergie par jour est de :

$$\frac{12\,000 \text{ kWh}}{365 \text{ jours}} \simeq 33 \text{ kWh/jour.}$$

14 200 km est un peu plus que la distance qui sépare Londres du Cap, en Afrique du sud (10 000 km) ou de Los Angeles (9 000 km). Je pense donc qu'ici, nous avons légèrement surestimé la distance d'un trajet intercontinental typique. Mais nous avons aussi surestimé le remplissage de l'avion : or si l'avion n'est pas rempli à 100 %, le coût énergétique par personne sera plus élevé. Si on ajuste la distance du trajet en la réduisant de 14 200 à 10 000 kilomètres, et si on suppose un taux de remplissage de l'avion de 80 %, on arrive à une valeur de 29 kWh par jour. Pour s'en souvenir plus facilement, j'arrondirai cette valeur à **30 kWh par jour**.

Que cela soit clair : faire un voyage long-courrier une fois par an coûte légèrement plus d'énergie que de laisser un radiateur électrique de 1 kW allumé en permanence, 24 heures sur 24, 365 jours par an.

De la même manière que le chapitre 3, dans lequel nous avons estimé ce que consommaient les voitures, était accompagné du chapitre A, qui propose un modèle de ce que devient l'énergie dans une voiture, ce chapitre s'accompagne d'un chapitre technique (chapitre C, page 318) qui décrit ce que devient l'énergie dans les avions. Ce chapitre C permet de répondre à des questions comme « est-ce qu'un voyage en avion coûterait significativement moins d'énergie si l'avion volait moins vite ? » La réponse est **non** : contrairement aux véhicules à roues, qui *peuvent* gagner en efficacité en roulant moins vite, les avions sont déjà quasiment au maximum de leur efficacité énergétique théorique. Les avions ne peuvent pas éviter de consommer de l'énergie pour deux raisons : ils doivent rejeter de l'air sous eux pour rester en l'air, et ils ont besoin d'énergie pour vaincre la résistance de l'air. Il n'y a aucun moyen de modifier la conception d'un avion pour en améliorer radicalement l'efficacité. Atteindre une amélioration de 10 %, c'est possible ? Oui, sans doute. Un avion deux fois plus efficace ? J'en mangerais mon chapeau.



Avions :
30 kWh/j

Voitures :
40 kWh/j

Vent :
20 kWh/j

FIGURE 5.1. Prendre un avion long-courrier une fois par an consomme environ 30 kWh par jour.

Interrogations

Mais les avions à turbopropulseurs, eux, ne sont-ils pas beaucoup plus efficaces en énergie ?

Non. Le Bombardier Q400 NextGen qualifié de « considérablement plus vert », « l’avion à turbopropulseurs le plus avancé du monde du point de vue technologique » selon son fabricant [www.q400.com], consomme 3,81 litres pour 100 passagers-km (à une vitesse de croisière de 667 km/h), ce qui représente un coût en énergie de 38 kWh pour 100 p-km. Le coût en énergie d’un 747 rempli est de 42 kWh pour 100 p-km. Donc les deux avions sont à peu près deux fois plus efficaces sur le plan énergétique qu’une voiture à un seul occupant (en prenant la voiture européenne typique dont nous avons parlé dans le chapitre 3.)

Est-ce que de prendre l’avion, d’une manière ou d’une autre, ça aggrave le changement climatique ?

Oui, c’est la conclusion des experts, même s’il reste une certaine incertitude à ce sujet [3fbufz]. Faire voler des avions crée d’autres gaz à effet de serre en plus du CO₂, comme la vapeur d’eau et l’ozone, et des gaz à effet de serre indirects, comme les oxydes d’azote. Si vous voulez estimer votre empreinte carbone en tonnes équivalent CO₂, prenez vos émissions de CO₂ dues à vos vols et multipliez-les par deux ou trois. Les diagrammes de ce livre ne prennent pas en compte ce facteur multiplicatif parce qu’ils se concentrent sur notre bilan énergétique.

La meilleure chose qu’on puisse faire au sujet des écologistes, c’est de les flinguer.

Michael O’Leary, PDG de Ryanair [3asmgy]

Notes et bibliographie

Page n°

42 *Boeing 747-400* – Les données proviennent de [9ehws]. Les avions d’aujourd’hui ne sont pas complètement remplis. Les compagnies aériennes sont fières lorsqu’elles atteignent un taux de remplissage moyen de 80 %. Les avions d’Easyjet sont remplis à 85 % en moyenne. (Source : TheLondonPaper, mardi 16 janvier 2007.) Un 747 rempli à 80 % consomme environ 53 kWh pour 100 km-passager. Et les vols court-courrier ? En 2007, Ryanair, la « compagnie aérienne la plus verte d’Europe », transportait ses passagers avec un coût de 37 kWh pour 100 p-km [3exmgv]. Cela signifie que voler à travers l’Europe coûte autant d’énergie que si les passagers allaient à leur destination en voiture à deux par voiture. (Pour avoir une idée des performances des autres compagnies, il suffit de jeter un coup d’œil au coût énergétique de RyanAir en l’an 2000, c’est-à-dire avant qu’elle ne fasse des investissements en faveur de l’environnement : il était supérieur à 73 kWh pour 100 p-km.) Le voyage de Londres



FIGURE 5.2. Un Bombardier Q400 NextGen. www.q400.com.

énergie par unité de distance (kWh pour 100 p-km)	
Voiture (4 occupants)	20
Avions Ryanair, année 2007	37
Bombardier Q400, plein	38
747, plein	42
747, rempli à 80 %	53
Avions Ryanair, an 2000	73
Voiture (1 occupant)	80

TABLEAU 5.3. Rendements énergétiques par passager de différents systèmes de transport, exprimés en quantité d’énergie requise pour 100 kilomètres et par passager.



FIGURE 5.4. Un Boeing 737-800 de la compagnie RyanAir. Photographie d’Adrian Pingstone.

à Rome fait 1 430 km, et de Londres à Malaga 1 735 km. Donc un aller-retour Londres–Rome avec la compagnie la plus verte a un coût en énergie de 1 050 kWh, et un aller-retour Londres–Malaga coûte 1 270 kWh. Si vous allez à Rome et à Malaga une fois par an, votre consommation moyenne de puissance sera de 6,3 kWh/j avec la compagnie aérienne la plus verte, et sans doute de 12 kWh/j avec une compagnie moins verte.

Qu'en est-il des grands voyageurs ? Pour détenir la carte « Silver Grand Voyageur » d'une compagnie aérienne internationale, il semble qu'il faille faire autour de 25 000 milles par an en classe économique. Cela fait autour de 60 kWh/j, en augmentant en proportion les chiffres énoncés dans ce chapitre, et en supposant que les avions ont un taux de remplissage de 80 %. Vous trouverez ci-dessous des chiffres supplémentaires provenant du Groupe Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) [yrnmum] : un 747-400 rempli à 100 %, qui parcourt 10 000 km avec une faible densité de sièges (262 places) a une consommation d'énergie de 50 kWh pour 100 p-km. Dans une configuration à haute densité de sièges (568 places) où il parcourt 4 000 km, le même avion a une consommation d'énergie de 22 kWh pour 100 p-km. Un Tupolev-154 court-courrier qui parcourt 2 235 km avec 70 % de ses 164 sièges occupés consomme 80 kWh pour 100 p-km.

- 42 Il n'y a aucun moyen de modifier la conception d'un avion pour en améliorer radicalement l'efficacité. En fait, l'objectif du *Advisory Council for Aerospace Research in Europe* (ACARE) est une réduction globale de 50 % de la quantité de combustible brûlé par passager-kilomètre d'ici à 2020 (par rapport à la consommation de l'an 2000), avec une amélioration de 15 à 20 % attendue du rendement des moteurs. En 2006, Rolls Royce avait atteint la moitié de cet objectif sur ses moteurs [36w5gz].
Dennis Bushnell, scientifique en chef au centre de recherche de la NASA de Langley, semble être d'accord avec moi concernant les espoirs que l'on peut avoir pour améliorer l'efficacité des avions. L'industrie aéronautique est mûre. « Il ne reste plus grand chose à gagner, à part une lente accumulation d'un ou deux pour cent ici et là sur de longues périodes de temps. » (New Scientist, 24 février 2007, page 33).
On s'attend à ce que le « *Silent Aircraft* » [silentaircraft.org/sax40], résultat d'une reconception radicale, soit 16 % plus efficace que les avions de forme traditionnelle s'il était construit (Nickol, 2008).
Si l'objectif de l'ACARE était atteint, ce serait vraisemblablement grâce à des avions mieux remplis et à une meilleure gestion du trafic aérien.

Court-courrier :
6 kWh/j

Grand
voyageur :
60 kWh/j

FIGURE 5.5. Deux voyages court-courriers sur la compagnie court-courrier la plus verte : 6,3 kWh/j. Voler suffisamment souvent pour atteindre le statut de Grand Voyageur Silver : 60 kWh/j.

6 Solaire

Notre but, pour le moment, c'est d'équilibrer notre consommation par une production d'énergie durable. Au cours des trois derniers chapitres, nous sommes arrivés à la conclusion que toute l'énergie que pourrait apporter le potentiel éolien terrestre au Royaume-Uni ne suffisait pas pour faire rouler nos voitures et voler nos avions. L'énergie solaire permettra-t-elle à la pile « production » de reprendre la tête ?

La densité du rayonnement solaire brut reçu à midi un jour sans nuages est de 1 000 W par mètre carré. Il s'agit de 1 000 W par m² de surface orientée vers le soleil, et non pas par m² de territoire. Pour obtenir la puissance par m² de *territoire* en Grande-Bretagne, il faut faire quelques **corrections** à cette mesure. Il faut compenser l'inclinaison des rayons du soleil par rapport à la verticale, ce qui réduit l'intensité du soleil à midi à environ 60 % de sa valeur à l'équateur (figure 6.1). Nous perdons de l'intensité car il n'est pas midi tout le temps. Durant un jour sans nuages en mars ou septembre, le ratio entre intensité *moyenne* et intensité à midi est d'environ 32 %. Enfin, on perd de la puissance à cause de la couverture nuageuse. Typiquement, au Royaume-Uni, le soleil brille seulement 34 % de la journée.

L'effet combiné de ces trois facteurs et, pour compliquer le tout, de l'alternance des saisons, fait qu'en Grande-Bretagne, la puissance brute moyenne de rayonnement solaire par mètre carré a une puissance d'environ 110 W/m² sur un toit orienté au sud, et d'environ 100 W/m² sur un sol horizontal.

On peut transformer cette puissance brute en puissance utile de quatre manières :

1. Le solaire thermique : en utilisant le soleil pour chauffer directement des bâtiments ou de l'eau.
2. Le photovoltaïque : en produisant de l'électricité.
3. La biomasse solaire : en utilisant les arbres, les bactéries, les algues, le maïs, le soja ou le colza pour produire des carburants, des produits chimiques, ou des matériaux de construction.
4. La nourriture : les mêmes produits que la biomasse solaire, mais pour alimenter les hommes ou les animaux.

(Dans un chapitre ultérieur, nous verrons quelques autres utilisables pour transformer l'énergie solaire dans les déserts.)

Faisons quelques estimations rapides des puissances maximales théoriques que chacune de ces manières pourrait fournir. Nous allons négliger leurs coûts économiques, et les coûts énergétiques pour construire et maintenir ces installations.

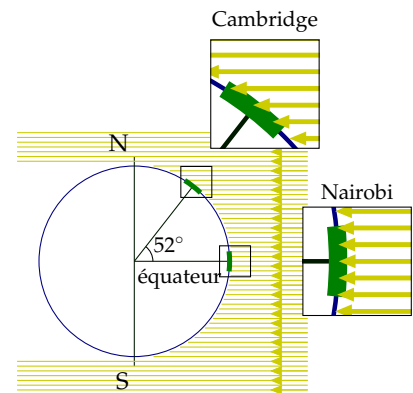


FIGURE 6.1. La lumière du soleil atteignant le sol à midi, un jour de printemps ou d'automne. La densité de lumière solaire par unité de surface à Cambridge (latitude 52°) est environ 60 % de celle à l'équateur.

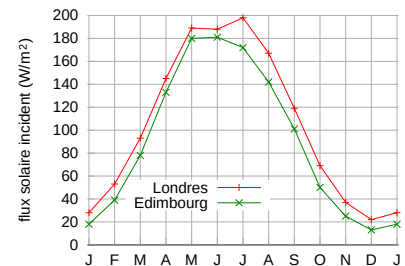
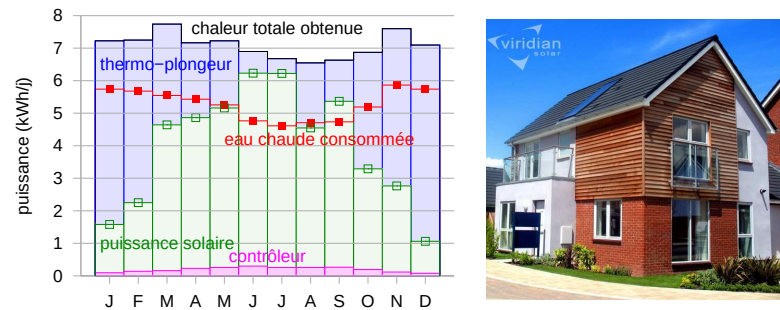


FIGURE 6.2. Intensité solaire moyenne à Londres et à Edimbourg selon la période de l'année. L'intensité moyenne, par unité de surface, est de 100 W/m².



Le solaire thermique

La technologie solaire la plus simple qui soit est un panneau qui produit de l'eau chaude. Imaginons de couvrir *tous* les toits orientés vers le sud par des panneaux solaires thermiques — ce qui ferait environ 10 m² de panneaux par personne — avec un rendement de 50 %, pour transformer les 110 W/m² de lumière solaire en eau chaude (figure 6.3). Si on fait la multiplication :

$$50 \% \times 10 \text{ m}^2 \times 110 \text{ W/m}^2$$

on trouve que le chauffage solaire pourrait fournir :

13 kWh par jour et par personne.

Dans la figure 6.4, j'ai coloré en blanc ce rectangle de production pour indiquer qu'il décrit la production d'énergie de faible qualité — l'eau chaude n'est pas aussi précieuse que l'énergie électrique que des éoliennes pourraient produire. On ne peut pas envoyer la chaleur dans le réseau électrique. Si on n'a pas besoin de la chaleur quand elle est disponible, alors elle est perdue. Il faut aussi garder à l'esprit que l'essentiel de cette chaleur capturée ne l'est pas au bon endroit : dans les villes, là où les gens vivent, l'habitat résidentiel possède moins de surface de toit que la moyenne nationale. De plus, cette puissance est fournie de façon non uniforme au cours de l'année.

Photovoltaïque

Des panneaux photovoltaïques (PV) convertissent la lumière solaire en électricité. Ces panneaux ont typiquement un rendement d'environ 10 % ; les plus chers atteignent 20 %. (Il y a des lois physiques fondamentales qui limitent le rendement des systèmes photovoltaïques à au mieux 60 % avec des miroirs ou des lentilles de concentration qui soient parfaits, et à 45 % sans concentration. Un dispositif produit en masse qui aurait un rendement supérieur à 30 % serait déjà une performance remarquable.) La

FIGURE 6.3. L'énergie solaire générée par un panneau thermique de 3 m² (en vert), et la chaleur supplémentaire nécessaire (en bleu) pour produire l'eau chaude dans la maison-test de Viridian Solar. (La photo montre une maison avec le même modèle de panneau sur le toit). La puissance solaire moyenne obtenue à partir de 3 m² a été de 3,8 kWh/j. L'expérience simulait la consommation d'eau chaude d'un ménage européen moyen — 100 litres d'eau chaude (à 60 °C) par jour. L'écart de 1,5 à 2 kWh/j entre la quantité de chaleur totale produite (ligne noire, en haut) et l'eau chaude consommée (ligne rouge) est due aux pertes de chaleur. La ligne violette indique la puissance électrique requise pour faire fonctionner le système solaire. La puissance moyenne par unité de surface de ces panneaux solaires est de 53 W/m².

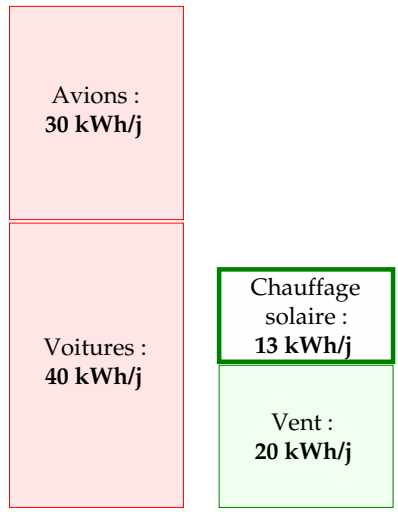


FIGURE 6.4. Le solaire thermique : 10 m² de panneaux thermiques peuvent fournir (en moyenne) environ 13 kWh par jour d'énergie thermique.

puissance moyenne fournie en Grande-Bretagne par des panneaux photovoltaïques avec un rendement de 20 % et orientés au sud serait de :

$$20 \% \times 110 \text{ W/m}^2 = 22 \text{ W/m}^2.$$

La Figure 6.5 nous montre des données qui confirment ce chiffre. Si on donnait à tout le monde 10 m² de panneaux solaires chers (avec un rendement de 20 %) et qu'on recouvrait tous les toits orientés au sud, ces panneaux fourniraient :

5 kWh par jour et par personne.

Puisque la surface totale des toits orientés au sud est de 10 m² par personne, il n'y a certainement pas assez de place sur nos toits pour mettre ces panneaux photovoltaïques en plus des panneaux thermiques de la section précédente. Nous devons donc choisir entre les deux : contribution photovoltaïque ou en eau chaude. Mais je vais juste les mettre tous les deux sur notre pile de production durable. Soit dit en passant, aujourd'hui, le coût d'installation de ces panneaux photovoltaïques est d'environ quatre fois celui des panneaux solaires thermiques, alors même qu'ils fournissent deux fois moins d'énergie, fût-elle de haute qualité (électricité). Si je devais donner un conseil à quelqu'un qui souhaite investir dans le solaire, je lui conseillerais donc d'étudier en premier l'option thermique. La solution la plus astucieuse, au moins dans les pays jouissant de beaucoup de soleil, ce sont les systèmes combinés capables de fournir à la fois de l'électricité et de l'eau chaude à partir d'une seule installation. C'est l'approche dont la société Heliodynamics a été à l'avant-garde, qui a réduit le coût global de ses systèmes en plaçant toute une série de miroirs plats se déplaçant lentement autour de petites unités photovoltaïques en arsénure de gallium de haute qualité ; ces miroirs concentrent la lumière sur les unités photovoltaïques, qui fournissent à la fois de l'électricité et de l'eau chaude ; l'eau chaude est produite en pompant de l'eau derrière les unités photovoltaïques.

Voici la conclusion que nous pouvons tirer pour l'instant : recouvrir de panneaux photovoltaïques la partie orientée au sud du toit de votre maison pourrait fournir juste assez de jus pour couvrir une bonne partie de votre consommation d'électricité personnelle moyenne, mais tous les toits du pays ne suffisent pas à faire une brèche sérieuse dans notre consommation totale d'énergie. Pour obtenir plus du photovoltaïque, il faut redescendre jusqu'à la terre ferme. Les guerriers du solaire de la figure 6.6 nous montrent la direction à suivre.

Rêvons un peu : les fermes solaires

Si on faisait une découverte capitale dans la technologie du solaire au point de suffisamment faire baisser le coût du photovoltaïque et permettre de couvrir les campagnes de panneaux solaires, quelle serait la production

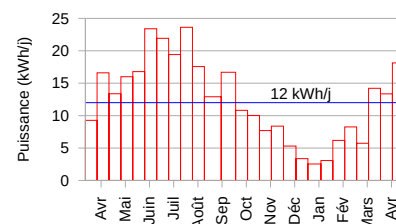


FIGURE 6.5. Le solaire photovoltaïque : les données proviennent d'un ensemble de 25 m² de panneaux installés dans le Cambridgeshire en 2006. La puissance-crête fournie par cet ensemble est environ 4 kW. La moyenne sur l'ensemble de l'année est de 12 kWh par jour. Ce qui fait 20 W par mètre carré de panneau.



FIGURE 6.6. Deux guerriers du solaire jouissant de leur système photovoltaïque, qui alimente leurs voitures électriques et leur maison. L'ensemble des 120 panneaux (chacun fournissant 300 W et couvrant 2,2 m²) couvre une surface de 268 m², et délivre en sortie une puissance-crête de 30,5 kW (en tenant compte des pertes dues à la conversion du courant continu en courant alternatif) et une production moyenne — en Californie, près de Santa Cruz — de 5 kW (19 W/m²). Photo aimablement fournie par Kenneth Adelman. www.solarwarrior.com

maximum théoriquement atteignable ? Eh bien, si on couvrait 5 % du territoire du Royaume-Uni avec des panneaux qui ont un rendement de 10 %, on pourrait obtenir :

$$10 \% \times 100 \text{ W/m}^2 \times 200 \text{ m}^2 \text{ par personne} \\ \simeq 50 \text{ kWh/jour/personne.}$$

Soit dit en passant, j'ai fait l'hypothèse que les panneaux n'avaient qu'un rendement de 10 %, parce que je n'imagine pas que des panneaux solaires puissent être produits en masse à une telle échelle à moins d'être très peu chers à produire à l'unité, et seuls les panneaux qui ont le plus faible rendement seront bon marché au début. La densité de puissance (c'est-à-dire la puissance par unité de surface) d'une telle ferme photovoltaïque serait alors de :

$$10 \% \times 100 \text{ W/m}^2 = 10 \text{ W/m}^2.$$

Il s'agit d'une densité de puissance deux fois plus grande que celle de la centrale du Solarpark en Bavière (figure 6.7).

Est-ce qu'une telle marée de panneaux solaires pourrait coexister avec l'armée de moulins à vent que nous avons imaginée au chapitre 4 ? Oui, sans aucun problème : les éoliennes ne font que très peu d'ombre, et des panneaux solaires au niveau du sol ont un effet négligeable sur le vent. Audacieux, ce plan l'est sans doute, mais jusqu'à quel point ? Pour produire ces 50 kWh par jour par personne au Royaume-Uni, la capacité de production d'énergie solaire qu'il faudrait est plus que 100 fois ce que le monde entier produit aujourd'hui à partir du photovoltaïque. Du coup,



FIGURE 6.7. Une ferme solaire photovoltaïque : le Solarpark de 6,3 MW (en crête) à Mühlhausen, en Bavière. On s'attend à ce que sa puissance moyenne par unité de surface soit d'environ 5 W/m². Photographie fournie par SunPower.

est-ce que je peux vraiment inclure ma ferme solaire dans ma pile de production durable ? J'hésite un peu. Au début de ce livre, je disais vouloir explorer ce que les lois de la physique disent au sujet des limites à l'énergie durable, en supposant que l'argent n'est pas un problème. Avec une hypothèse pareille, je devrais le faire, sans aucun doute : industrialiser la campagne, et placer les fermes photovoltaïques sur ma pile de production. Mais en même temps, je cherche aussi à vous aider à comprendre ce qu'il va falloir faire entre *maintenant*, et 2050. Et maintenant, l'électricité produite par des fermes photovoltaïques serait quatre fois plus chère que le prix du marché. Ça me semble donc un peu irresponsable d'inclure cette estimation dans la pile de production durable de la figure 6.9 — il y a tellement de raisons pour lesquelles recouvrir 5 % du Royaume-Uni par des panneaux solaires semble largement au-delà de toute crédibilité. Si on envisageait sérieusement de se lancer dans un tel projet, il serait sans doute préférable de mettre les panneaux dans un pays deux fois plus ensoleillé et de rapatrier une partie de l'énergie obtenue par des lignes électriques. Nous reviendrons sur cette idée dans le chapitre 25.

Légendes urbaines

Fabriquer un panneau solaire consomme plus d'énergie qu'il n'en produira jamais.

C'est faux. Le *ratio énergétique* (pour un système donné, le rapport entre la quantité d'énergie fournie sur l'ensemble de sa durée de vie, et la quantité d'énergie consommée pour le fabriquer) d'un système solaire installé sur un toit et raccordé au réseau dans le centre de l'Europe du Nord est de 4, pour un système d'une durée de vie de 20 ans (Richards et Watt, 2007) ; il est supérieur à 7 dans un lieu plus ensoleillé comme l'Australie. (Un ratio énergétique supérieur à un est Une Bonne Chose, sur le plan énergétique). A titre de comparaison, les éoliennes d'une durée de vie de 20 ans ont un ratio énergétique de 80.

Les panneaux photovoltaïques ne vont-ils pas devenir de plus en plus efficaces au fur et à mesure que l'on fera des progrès technologiques ?

Je ne doute pas que les panneaux photovoltaïques deviennent toujours *moins chers* ; je ne doute pas non plus qu'il faudra toujours de moins en moins d'énergie pour les *fabriquer*. Leur ratio énergétique ira donc croissant. Mais les estimations dans ce chapitre ne se fixaient pas de limite sur le coût économique des panneaux ou le coût énergétique de leur fabrication. Ce chapitre se focalisait sur la puissance maximale théorique qu'ils peuvent fournir. Avec un rendement de 20 %, les panneaux photovoltaïques sont déjà proches de leur limite théorique (voir les notes en fin de ce chapitre). Je serais extrêmement surpris si les estimations de ce chapitre concernant les cellules photovoltaïques en toiture devaient être révisées un jour.

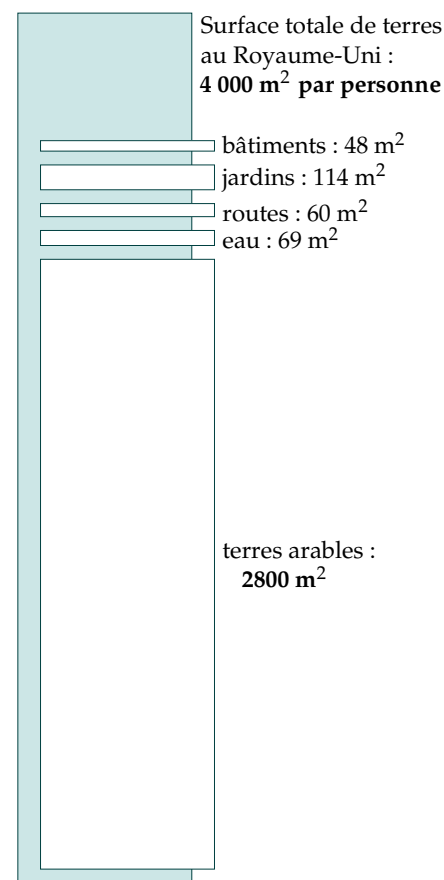


FIGURE 6.8. Répartition des surfaces de terres par type d'usage, par personne, en Grande-Bretagne.

La biomasse solaire

D'un seul coup, vous voyez, on pourrait se retrouver dans le business de l'énergie simplement parce qu'on fait pousser de l'herbe dans son ranch ! Et qu'on peut la couper et la convertir en énergie. C'est ce qui est sur le point d'arriver.

George W. Bush, février 2006

Dans toutes les solutions bioénergétiques disponibles, on commence par faire pousser de la verdure, pour en faire ensuite quelque chose. Combien d'énergie pourrait-on collecter grâce à elle ? En fait, il y a quatre grandes manières de tirer de l'énergie de systèmes biologiques alimentés par l'énergie solaire :

1. On peut faire pousser des plantes choisies spécialement et les brûler dans une centrale qui produit de l'électricité, ou de la chaleur, ou les deux. On appelle cela un « substitut au charbon ».
2. On peut faire pousser des plantes choisies spécialement (colza, canne à sucre, maïs ou soja, par exemple), pour en obtenir de l'éthanol ou du biogazole, que l'on utilise ensuite pour alimenter les voitures, les trains, les avions ou tout autre endroit où ces produits chimiques sont utiles. On peut aussi cultiver des bactéries génétiquement modifiées, des cyanobactéries, ou des algues qui produiraient directement de l'hydrogène, de l'éthanol, du butanol ou même de l'électricité. On appelle toutes ces approches des « substituts au pétrole ».
3. On peut prendre des sous-produits d'autres activités agricoles et les brûler dans une centrale. Les sous-produits peuvent aller de la paille (un sous-produit des biscottes) aux fientes de poulet (un sous-produit des McNuggets). Brûler ainsi des sous-produits, c'est toujours un substitut au charbon, tant qu'on utilise des plantes ordinaires et non les meilleures plantes à haute valeur énergétique. Une centrale qui brûle des sous-produits agricoles ne fournira pas autant de puissance par unité de surface de terre agricole qu'une installation optimisée de production de biomasse, mais elle a l'avantage de ne pas monopoliser les terres. Brûler du méthane produit par les décharges d'ordures est une autre manière d'obtenir de l'énergie, mais elle n'est durable qu'à condition que la source de production des déchets à mettre en décharge soit elle-même durable. (L'essentiel du méthane issu des décharges provient de nourriture jetée ; les Britanniques jettent de l'ordre de 300 g de nourriture par jour et par personne.) Incinérer les déchets ménagers est encore une autre manière, un peu moins détournée, d'obtenir de l'énergie à partir de biomasse solaire.
4. On peut faire pousser des plantes et les donner directement à manger aux hommes ou à d'autres animaux qui ont besoin d'énergie.

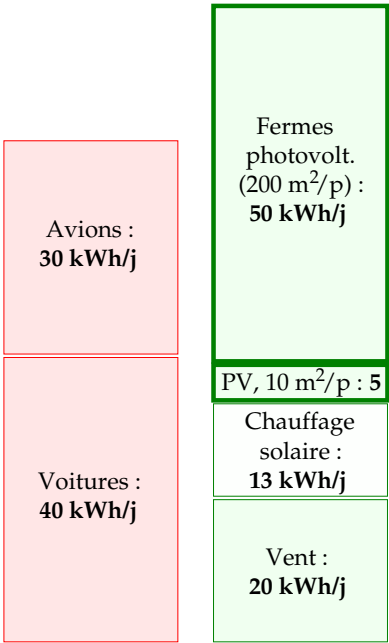


FIGURE 6.9. Le solaire photovoltaïque : 10 m² de panneaux photovoltaïques installés sur des toits orientés au sud, avec un rendement de 20 %, peuvent fournir environ 5 kWh par jour d'énergie électrique. Si 5 % du pays étaient recouverts de panneaux solaires avec un rendement de 10 % (200 m² de panneaux par personne), ils fourniraient 50 kWh/j par personne.

Pour l'ensemble de ces processus, la première escale de l'énergie est au sein d'une molécule chimique dans une plante verte, typiquement un glucide. On peut donc estimer la puissance pouvant être obtenue par tous ces processus en estimant le flux énergétique qui transite par cette première étape. Toutes les étapes ultérieures impliquant tracteurs, animaux, usines chimiques, décharges ou centrales électriques ne peuvent que perdre de l'énergie. Par conséquent, la puissance à la première escale constitue une limite supérieure à la puissance que peuvent fournir toutes les solutions énergétiques basées sur les plantes.

Essayons donc tout simplement d'estimer la puissance au début de la chaîne. (Dans le chapitre D, nous entrerons plus dans les détails dans l'estimation de la contribution maximale de chaque processus.) La puissance moyenne exploitable de la lumière du soleil en Grande-Bretagne est de 100 W/m^2 . Les plantes les plus efficaces en Europe ont un rendement d'environ 2 % pour transformer l'énergie solaire en glucides, ce qui pourrait suggérer que les plantes peuvent fournir 2 W/m^2 ; toutefois, leur rendement baisse fortement avec des luminosités plus élevées, et dans les faits, la meilleure performance que l'on puisse obtenir en Europe avec des cultures énergétiques est plus proche de $0,5 \text{ W/m}^2$. Si on couvre 75 % du pays avec de la verdure de qualité, cela représente $3\,000 \text{ m}^2$ par personne consacrés à la bio-énergie. C'est la surface actuellement consacrée à l'agriculture en Grande-Bretagne. La puissance maximale atteignable, en ignorant tous les coûts supplémentaires, pour faire pousser, récolter et traiter la verdure, est donc de :

$$0,5 \text{ W/m}^2 \times 3\,000 \text{ m}^2 \text{ par personne} = 36 \text{ kWh/j par personne.}$$

Houlà ! Ça ne fait pas des masses, compte tenu des hypothèses outrageusement généreuses que nous venons de faire pour essayer d'obtenir un grand chiffre. Si en plus, vous voulez produire des agrocarburants pour les voitures ou les avions, toutes les autres étapes de la chaîne de production, de la ferme au piston, seront inévitablement peu efficaces. A mon avis, espérer que les pertes tout au long de la chaîne soient inférieures à 33 % serait plutôt optimiste. Même le fait de brûler du bois sec dans une bonne chaudière fait perdre 20 % de la chaleur, qui partent dans la cheminée. Donc à coup sûr, le véritable potentiel de puissance de la biomasse et des agrocarburants n'excédera pas **$24 \text{ kWh/j par personne}$** . Et n'oubliez pas qu'il nous faut quand même un peu de verdure pour produire des aliments pour nous nourrir et nourrir nos animaux.

Le génie génétique pourrait-il créer des plants capables de convertir l'énergie solaire en substances chimiques de manière plus efficace ? En théorie, ça devrait être possible, mais je n'ai trouvé aucune publication scientifique qui prédise que les plantes en Europe pourraient atteindre une production énergétique nette dépassant 1 W/m^2 .

Je vais ajouter $24 \text{ kWh/j par personne}$ sur notre pile verte, en insistant sur le fait qu'à mon sens, ce chiffre est surévalué — à mon avis, la véri-



FIGURE 6.10. L'herbacée *Miscanthus* profitant de la compagnie du Dr Emily Heaton, qui mesure 1,63 m. En Grande-Bretagne, le *Miscanthus* atteint une puissance par unité de surface de $0,75 \text{ W/m}^2$. Photographie fournie par l'université de l'Illinois.

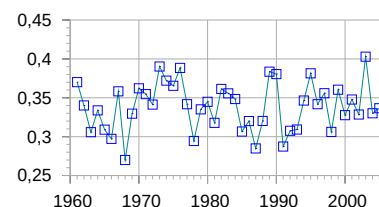


FIGURE 6.11. L'ensoleillement de Cambridge : le nombre d'heures ensoleillées par an, exprimé sous la forme d'une fraction du nombre total d'heures de jour dans l'année.

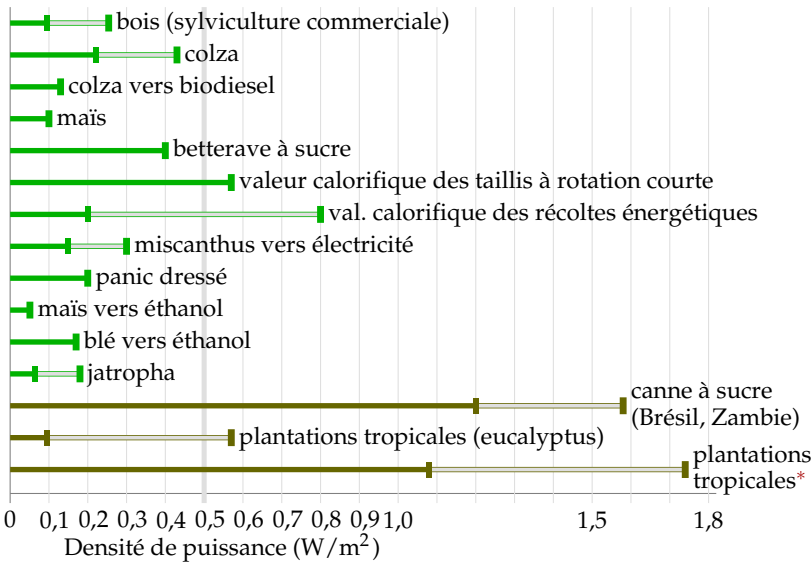


FIGURE 6.12. La production de puissance, par unité de surface, atteinte par diverses plantes. Pour les sources, se référer aux notes de fin de chapitre. Ces densités de puissance varient selon l'irrigation et la fertilisation. Des fourchettes sont précisées pour certaines cultures, par exemple la puissance obtenue avec le bois, qui va de 0,095 à 0,254 W/m². Les trois densités de puissance du bas concernent des plantes cultivées dans des régions tropicales. La dernière densité de puissance (plantations tropicales*) suppose le recours à des modifications génétiques, aux engrais et à l'irrigation. Dans le texte, j'utilise 0,5 W/m² comme valeur de synthèse des meilleures cultures énergétiques du nord-ouest de l'Europe.

table puissance maximale que l'on puisse espérer tirer de la biomasse sera moindre en raison des pertes dans les processus agricoles et agroalimentaires qui s'ensuivent.

Je pense que la conclusion est claire : *avec les biocarburants, le compte n'est pas bon* — du moins, pas dans des pays comme la Grande-Bretagne, et pas pour remplacer tous les carburants destinés au transport. Même en laissant de côté les principaux défauts des biocarburants — le fait que leur production entre en concurrence avec la production de nourriture, et que les intrants supplémentaires qu'il faut utiliser pour les produire puis les transformer annulent souvent la plupart de l'énergie qu'ils fournissent (figure 6.14) — les agrocarburants, dans un pays européen comme la Grande-Bretagne, sont capables de fournir tellement peu de puissance, qu'à mon avis ce n'est même pas la peine d'en parler.

Notes et bibliographie

Page n°

- 45 ...compenser l'inclinaison des rayons du soleil par rapport à la verticale. La latitude de Cambridge est de $\theta = 52^\circ$; l'intensité du rayonnement solaire à midi est à multiplier par $\cos \theta \simeq 0,6$. Le facteur exact dépend de la période de l'année, et varie entre $\cos(\theta + 23^\circ) = 0,26$ et $\cos(\theta - 23^\circ) = 0,87$.
- *Typiquement, au Royaume-Uni, le soleil brille seulement un tiers de la journée.* Les Highlands reçoivent 1 100 h de soleil par an — un ensoleillement de 25 %. Les meilleurs sites en Écosse reçoivent 1 400 h par an — soit 32 %. Cambridge : 1 500 ± 130 h par an — 34 %. Côte sud de l'Angleterre (la partie la plus ensoleillée du Royaume-Uni) : 1 700 h par an — 39 %. [2rq1oc] Les données de Cambridge proviennent de [2szckw]. Voir également la figure 6.16.

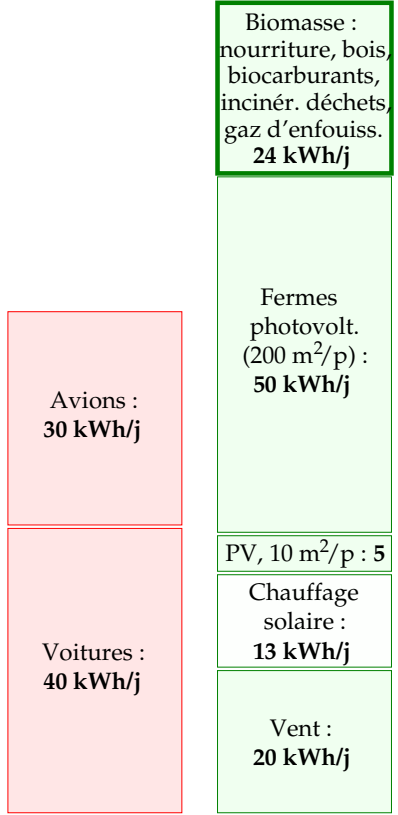


FIGURE 6.13. La biomasse solaire, y compris toutes les formes de bio/agrocarburants, l'incinération des déchets et l'alimentation : 24 kWh/j par personne.

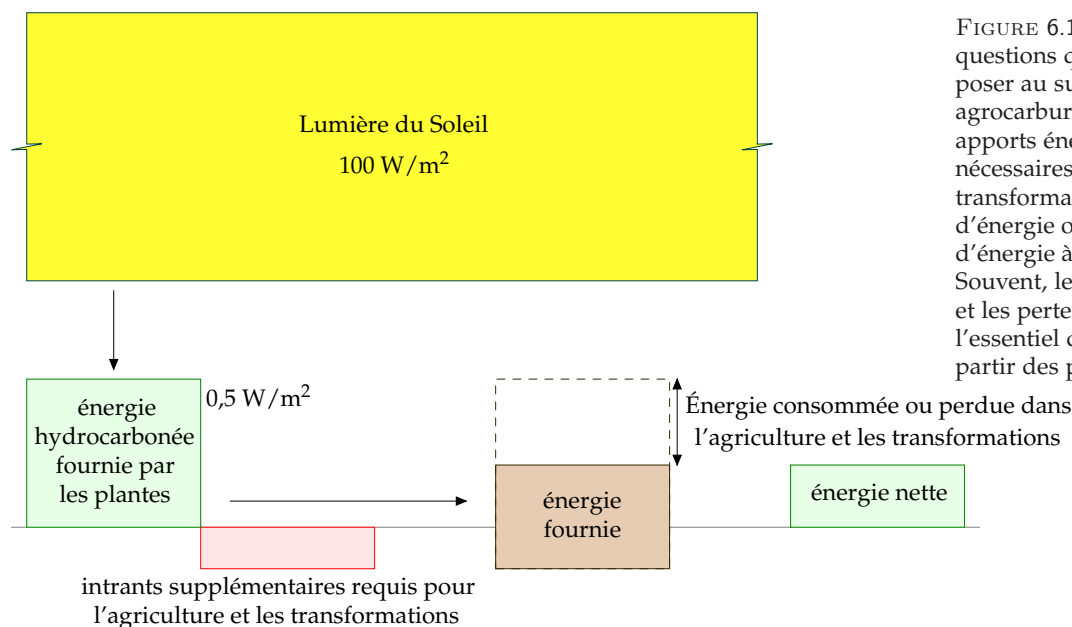


FIGURE 6.14. Cette figure illustre les questions quantitatives qu'il faut se poser au sujet de n'importe quel agrocarburant proposé. Quels sont les apports énergétiques supplémentaires nécessaires à la culture et à la transformation ? Quelle est la quantité d'énergie obtenue ? La quantité *nette* d'énergie à la fin du processus ? Souvent, les intrants supplémentaires et les pertes inévitables effacent l'essentiel de l'énergie obtenue à partir des plantes.

45 *En Grande-Bretagne, la puissance brute moyenne de rayonnement solaire par mètre carré est d'environ 110 W/m^2 sur un toit orienté au sud, et d'environ 100 W/m^2 sur un sol horizontal.* Source : NASA « Surface meteorology and Solar Energy » (en anglais) [5hrx1s]. Surpris qu'il y ait si peu de différence entre un toit penché orienté au sud et un toit horizontal ? Je l'ai été aussi. En fait, la différence n'est que de 10 % [6z9epq].

46 *... cela ferait environ 10 m^2 de panneaux par personne.* J'ai estimé la surface de toits orientés au sud par personne en prenant la surface de territoire par personne qui est couverte par des bâtiments (48 m^2 en Angleterre — tableau I.6), en la multipliant par $1/4$ pour obtenir la fraction orientée au sud, et en la faisant grimper de 40 % pour tenir compte de l'orientation du toit qui en augmente la surface. Cela donne 16 m^2 par personne. Habituellement, les panneaux sont livrés sous forme de rectangles peu pratiques qui laissent une partie du toit découverte ; d'où les 10 m^2 de panneaux.

47 *La puissance moyenne fournie par des panneaux photovoltaïques...*

Il existe une idée reçue bien vivace selon laquelle les panneaux solaires produiraient presque autant de puissance sous les nuages que sous le soleil. C'est tout simplement faux. Durant une journée nuageuse bien que lumineuse, les panneaux ou les centrales photovoltaïques continuent de convertir de l'énergie, mais beaucoup moins : la production photovoltaïque est divisée par environ dix quand le soleil passe derrière des nuages (parce que l'intensité lumineuse en provenance du soleil est elle-même divisée par dix). Comme le montre la figure 6.15, la puissance fournie par les panneaux photovoltaïques est presque exactement proportionnelle à l'intensité de la lumière du soleil — du moins, lorsque les panneaux sont à 25°C . Pour rendre les choses un peu plus compliquées, la puissance fournie dépend

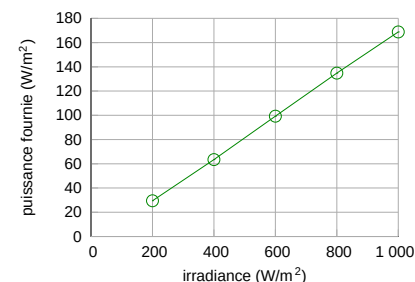


FIGURE 6.15. La puissance produite par le module Sanyo HIP-210NKHE1 en fonction de l'intensité lumineuse (à 25°C , en supposant une tension électrique de sortie de 40 V). Source : données techniques, www.sanyo-solar.eu.

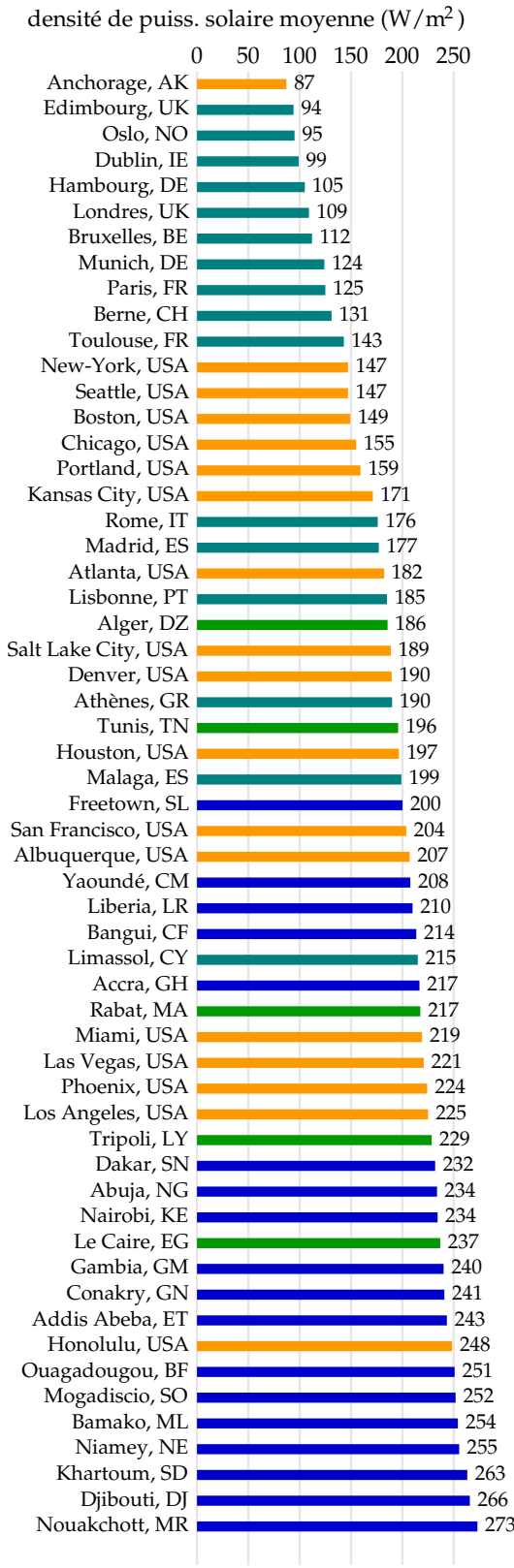
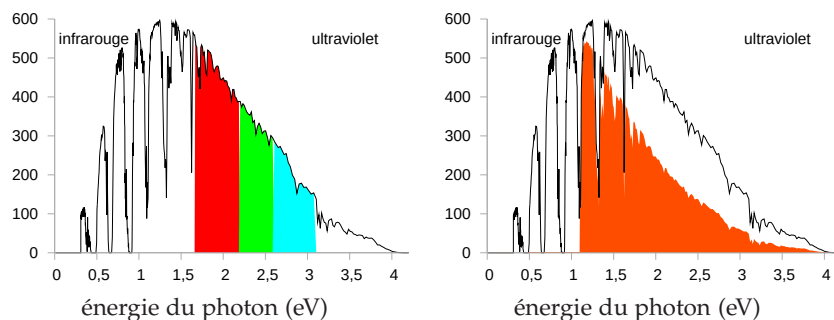


FIGURE 6.16. La puissance moyenne de la lumière solaire tombant sur une surface horizontale dans divers endroits en Europe, en Amérique du Nord et en Afrique.





aussi de la température — des panneaux plus chauds voient leur production de puissance baisser (typiquement de 0,38 % par °C) — mais si vous vérifiez les données obtenues à partir de véritables panneaux, par exemple sur www.solarwarrior.com, vous aurez la confirmation de la principale constatation : la production d'un panneau est *beaucoup plus faible* sous les nuages que sous le soleil direct. Cette question est embrouillée par certains promoteurs du photovoltaïque qui essaient de débattre de la manière dont le « rendement » varie avec l'ensoleillement. « Les panneaux sont plus efficaces sous les nuages », disent-ils ; c'est peut-être vrai, mais il ne faut pas confondre rendement de conversion d'énergie d'une part, et puissance effectivement fournie d'autre part.

46 Ces panneaux ont typiquement un rendement d'environ 10 % ; les plus chers atteignent 20 %. Voir figure 6.18. Sources : Turkenburg (2000), Sunpower www.sunpowercorp.com, Sanyo www.sanyo-solar.eu, Suntech.

- Un dispositif produit en masse qui aurait un rendement supérieur à 30 % serait déjà une performance remarquable. Il s'agit d'une citation tirée de Hopfield et Gollub (1978), au sujet des panneaux sans miroir ni lentille de concentration. La limite théorique pour un panneau photovoltaïque standard « à simple jonction » sans concentrateur, appelée limite de Shockley–Queisser, dit qu'au plus 31 % de l'énergie lumineuse peut être convertie en électricité (Shockley et Queisser, 1961). (La principale raison justifiant cette limite est qu'un matériau solaire standard possède une propriété baptisée le « gap », qui définit le niveau d'énergie d'un photon que ce matériau convertit avec la plus grande efficacité. La lumière solaire est constituée de photons avec des énergies très différentes ; les photons avec une énergie *plus faible* que celle du gap ne sont pas exploités ; les photons avec une énergie *plus grande* que celle du gap peuvent être capturés, mais toute la quantité d'énergie supplémentaire qu'ils transportent est perdue.) Des concentrateurs (lentilles ou miroirs) peuvent à la fois réduire le coût (par watt) des systèmes photovoltaïques, et augmenter leur rendement. La limite de Shockley–Queisser de rendement des panneaux solaires avec concentrateurs est de 41 %. La seule manière de dépasser la limite de Shockley–Queisser est de fabriquer des dispositifs photovoltaïques compliqués qui séparent la lumière selon ses différentes longueurs d'onde, traitant chaque intervalle de longueurs d'onde avec son propre gap. C'est ce qu'on appelle les cellules multi-jonctions. Des rendements autour de 40 % ont récemment été annoncés pour de tels sys-

FIGURE 6.17. Une partie de l'explication de Shockley et Queisser au sujet de la limite de 31 % de rendement d'un système photovoltaïque simple. A gauche : le spectre de la lumière du soleil de midi. L'axe vertical représente la densité de puissance en W/m^2 par électron-volt d'intervalle spectral. La partie visible du spectre est indiquée par la section colorée. A droite : la quantité d'énergie captée par un dispositif photovoltaïque avec un gap unique à 1,1 électron-volt est représentée par la zone en rouge. Les photons d'énergie inférieure au gap sont perdus. Une partie de l'énergie des photons au-dessus du gap est également perdue ; par exemple, la moitié de l'énergie de chaque photon de 2,2 électrons-volts est perdue. Des pertes supplémentaires ont lieu à cause du rayonnement inévitable des charges se recombinant dans le matériau photovoltaïque.

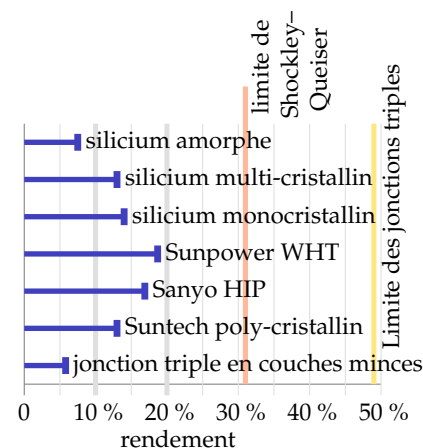


FIGURE 6.18. Le rendement des modules photovoltaïques en vente aujourd'hui. Dans le texte, je suppose que les panneaux photovoltaïques installés sur les toits ont un rendement de 20 %, et que ceux installés dans les campagnes ont un rendement de 10 %. Avec une densité de puissance moyenne de lumière solaire de $100 \text{ W}/\text{m}^2$, des panneaux avec un rendement de 20 % fournissent $20 \text{ W}/\text{m}^2$.

tèmes équipés de concentrateurs optiques. [2t17t6], www.spectrolab.com. En juillet 2007, l'université du Delaware a annoncé avoir atteint un rendement de 42,8 % avec une concentration d'un facteur 20 [6hobq2], [21sx6t]. En août 2008, le NREL a annoncé un rendement de 40,8 % avec une concentration d'un facteur 326 [62ccou]. Curieusement, ces deux résultats furent qualifiés de records mondiaux de rendement. Mais aujourd'hui, concrètement, quels sont les dispositifs multi-jonctions disponibles sur le marché ? Uni-solar vend un panneau de 58 W (en crête) en couches minces et à triple jonction, d'une surface de 1 m². Ce qui signifie un rendement, en plein soleil, de seulement 5,8 %.

47 *Figure 6.5 : données sur le photovoltaïque.* Données et photographie aimablement fournies par Jonathan Kimmitt.

– *Heliodynamics* – www.hdsolar.com. Voir figure 6.19.
Un système semblable est fabriqué par Arontis www.arontis.se.

48 *Le Solarpark à Mühlhausen, en Bavière.* On s'attend à ce qu'en moyenne, cette ferme de 25 hectares fournisse 0,7 MW (soit 17 000 kWh par jour).

La station de métro Stillwell Avenue, à New York, a intégré des panneaux photovoltaïques en silicone amorphe en couches minces dans sa verrière, qui fournissent 4 W/m² (Fies et al., 2007).

La centrale solaire de Nellis, dans l'Etat du Nevada, dont la construction s'est achevée en décembre 2007, couvre environ 57 hectares, et on s'attend à ce qu'elle génère 30 GWh par an, soit 6 W/m² [5hzs5y].

La centrale solaire de Serpa, au Portugal, qualifiée de « centrale solaire la plus puissante au monde » [39z5m5] [2uk8q8], dispose de panneaux qui suivent la course du Soleil dans le ciel et qui occupent 60 hectares, soit 600 000 m² ou 0,6 km² (environ 84 terrains de football). On s'attend à ce qu'elle produise 20 GWh par an, soit 2,3 MW en moyenne. Ce qui fait une puissance par unité de surface de 3,8 W/m².

– *Pour produire les 50 kWh/j par Britannique, la capacité de production d'énergie à partir du soleil qu'il faudrait est plus de 100 fois ce que le monde entier produit aujourd'hui à partir du photovoltaïque.* Pour produire 50 kWh/j par personne en Grande-Bretagne, il faudrait produire une puissance moyenne de 125 GW, ce qui requiert 1 250 GW de capacité de production. Fin 2007, l'intégralité du parc photovoltaïque installé dans le monde atteignait une puissance-crête de 10 GW, augmentant en gros à un rythme de 2 GW par an.

49 *... recouvrir 5 % du Royaume-Uni par des panneaux solaires semble largement au-delà de toute crédibilité.* La principale raison qui me pousse à penser que couvrir ainsi le territoire n'est pas crédible, c'est que les Britanniques préfèrent largement utiliser leurs campagnes pour l'agriculture et les loisirs plutôt que pour y pratiquer l'élevage intensif de panneaux solaires. Un autre sujet d'inquiétude, c'est le coût. Ce livre n'est pas un livre d'économie, mais voici néanmoins quelques chiffres : au tarif de la ferme solaire bavaroise, fournir 50 kWh/j par personne coûterait 91 000 € par personne ; si cette centrale durait 20 ans sans nécessiter de dépense supplémentaire, le prix de gros de l'électricité qu'elle produirait reviendrait à 25 centimes d'euros par kWh, à comparer au tarif actuel de l'électricité en Europe, moitié moins cher. A lire pour en savoir plus : David Carlson, BP solar [2ahcep].



FIGURE 6.19. Une unité de cogénération photovoltaïque (chaleur et électricité) fabriquée par Heliodynamics. Un réflecteur couvrant 32 m² (un peu plus grand que le côté d'un bus à deux étages) fournit jusqu'à 10 kW de chaleur et 1,5 kW de puissance électrique. Dans le sud des États-Unis, un de ces dispositifs d'une tonne pourrait fournir de l'ordre de 60 kWh/j de chaleur et de 9 kWh/j d'électricité. Ces puissances correspondent à des flux moyens de 80 W/m² de chaleur et 12 W/m² d'électricité (par mètre carré de surface photovoltaïque cogénératrice) ; ces flux sont similaires à ceux fournis par des panneaux solaires thermiques et photovoltaïques standards, mais la conception de concentration de Heliodynamics fournit cette puissance à moindre coût, parce que l'essentiel du matériau utilisé est une vitre plate toute simple. A titre de comparaison, la consommation totale de puissance d'un Européen moyen est de 125 kWh/j.

50 *Les Britanniques jettent de l'ordre de 300 g de nourriture par jour et par personne.* Source : Ventour (2008).

51 *Figure 6.10.* Aux États-Unis, du *Miscanthus* cultivé sans engrais azoté fournit environ 24 tonnes de matière sèche par hectare et par an. En Grande-Bretagne, des rendements annuels de 12 à 16 tonnes à l'hectare ont été annoncés. La valeur calorifique nette du *Miscanthus* sec est de 17 MJ/kg, donc les rendements britanniques correspondent à une densité de puissance de 0,75 W/m². Sources : Heaton et al. (2004) et [6kqq77]. Le rendement estimé n'est atteint qu'après trois ans de culture sans récolte.

- *Les plantes les plus efficaces ont un rendement d'environ 2 % [...] dans les faits, la meilleure performance que l'on puisse obtenir en Europe avec des cultures énergétiques est plus proche de 0,5 W/m². Dans des conditions de faible lumière, les meilleures plantes britanniques atteignent un rendement de 2,4 % si les champs sont bien fertilisés (Monteith, 1977), mais lorsque la lumière est plus forte, leur rendement de conversion s'effondre. Selon Turkenburg (2000) et Schiermeier et al. (2008), le rendement de conversion de l'énergie solaire en énergie de biomasse est inférieure à 1 %.*

Voici quelques sources pour étayer l'estimation que je donne de 0,5 W/m² de la densité de puissance végétale au Royaume-Uni. L'estimation de la Commission Royale sur la pollution environnementale, de la densité de puissance potentiellement fournie par des cultures énergétiques en Grande-Bretagne est de 0,2 W/m² (Royal Commission on Environmental Pollution, 2004). A la page 43 du document de la Royal Society sur les agrocarburants (Royal Society working group on biofuels, 2008), *Miscanthus* apparaît tout en haut de la liste, fournissant environ 0,8 W/m² de puissance chimique.

Dans le Rapport d'évaluation sur l'énergie du PNUE, Rogner (2000) écrit : « en supposant un rendement de conversion en électricité de 45 % et des rendements annuels de 15 tonnes de matière sèche par hectare, il faudrait 2 km² de plantation pour chaque mégawatt d'électricité de capacité installée fonctionnant 4 000 heures par an ». Cela fait une puissance par unité de surface de 0,23 W(e)/m². (1 W(e) signifie 1 watt de puissance électrique).

Energy for Sustainable Development Ltd (2003) estime que des taillis à rotation courte peuvent fournir plus de 10 tonnes de bois sec par hectare et par an, ce qui correspond à une densité de puissance de 0,57 W/m². (Le bois sec a une capacité calorifique de 5 kWh par kg.)

Selon Archer et Barber (2004), le rendement instantané d'une feuille en bonne santé et dans des conditions optimales peut approcher 5 %, mais l'efficacité de stockage de l'énergie à long terme des cultures modernes est plutôt de l'ordre de 0,5 à 1 %. Archer et Barber suggèrent que par modification génétique, il doit être possible d'améliorer le rendement de stockage des plantes, en particulier des *plantes en C4*, que l'évolution a déjà naturellement dotées d'une photosynthèse plus efficace. Les plantes en C4 sont surtout présentes sous les tropiques et se plaisent dans les climats chauds ; elles ne peuvent pas pousser en-dessous de 10 °C. Parmi les plantes en C4, on trouve la canne à sucre, le maïs, le sorgho, le mil rouge et le panic érigé. Zhu et al. (2008) ont calculé que la limite théorique du rendement de conversion de l'énergie solaire en biomasse était de 4,6 % pour la photosynthèse en C3 avec une température de 30 °C et la concentration actuelle de CO₂ dans l'atmosphère

(380 ppm), et de 6 % pour la photosynthèse en C4. Selon eux, les rendements de conversion de l'énergie solaire les plus élevés qui ont été observés pour des cultures de plantes en C3 et en C4 sont respectivement de 2,4 % et 3,7 %; et, citant Boyer (1982), que les rendements moyens de conversion des principales cultures aux États-Unis sont 3 ou 4 fois plus faibles que ces rendements records (autrement dit, elles ont des rendements de l'ordre de 1 %). Une des raisons pour lesquelles les plantes n'atteignent pas la limite théorique provient de leur incapacité à utiliser l'intégralité du rayonnement provenant d'un plein soleil. Ces deux papiers (Zhu et al., 2008; Boyer, 1982) débattent des perspectives de génie génétique pour rendre ces plantes plus efficaces.

- 52 *Figure 6.12.* Les chiffres dans cette figure proviennent de Rogner (2000) (rendements énergétiques nets du bois, du colza, de la canne à sucre et d'autres plantations tropicales); Bayer Crop Science (2003) (colza vers biodiesel); Francis et al. (2005) et Asselbergs et al. (2006) (jatropha); Mabee et al. (2006) (canne à sucre, Brésil); Schmer et al. (2008) (panic érigé, une culture marginale aux États-Unis); Shapouri et al. (1995) (maïs vers éthanol); Royal Commission on Environmental Pollution (2004); Royal Society working group on biofuels (2008); Energy for Sustainable Development Ltd (2003); Archer et Barber (2004); Boyer (1982); Monteith (1977).
- 51 *Même le fait de brûler du bois bien sec dans une bonne chaudière fait perdre 20 % de chaleur qui part dans la cheminée.* Sources : Royal Society working group on biofuels (2008); Royal Commission on Environmental Pollution (2004).

7 Chauffer et refroidir

Ce chapitre étudie sous toutes ses coutures la question de savoir combien de puissance on consomme pour contrôler la température de tout ce qui nous entoure — à la maison comme au travail — et pour chauffer ou refroidir notre nourriture, nos boissons, notre linge ou encore notre vaisselle sale.

L'eau chaude domestique

Notre plus grand usage d'eau chaude dans une maison, c'est pour prendre des bains, des douches, laver la vaisselle ou le linge — cela dépend de notre style de vie. Commençons par essayer d'estimer la quantité d'énergie utilisée pour prendre un bain chaud.

Le volume d'eau pour un bain est de l'ordre de $50\text{ cm} \times 15\text{ cm} \times 150\text{ cm} \simeq 110$ litres. Disons que la température du bain est de 50°C et que l'eau arrivant dans la maison est à 10°C . La capacité calorifique de l'eau, qui mesure combien d'énergie il faut pour la chauffer, est de $4\,200\text{ J}$ par litre et par degré Celsius. La quantité d'énergie qu'il faut pour réchauffer l'eau de 40°C est de :

$$4\,200\text{ J/litre}/^\circ\text{C} \times 110\text{ litres} \times 40^\circ\text{C} \simeq 18\text{ MJ} \simeq 5\text{ kWh}.$$

Prendre un bain consomme donc environ **5 kWh**. A titre de comparaison, prendre une douche (30 litres) consomme environ **1,4 kWh**.

Bouilloires et cuisinières

Pays civilisé, la Grande-Bretagne est dotée d'un réseau qui fournit de l'électricité domestique en 230 V . Grâce à cela, on peut faire bouillir plusieurs litres d'eau en quelques minutes dans une bouilloire électrique. Ces bouilloires ont une puissance de 3 kW . Pourquoi 3 kW ? Parce que c'est la puissance maximum qu'une prise électrique de 230 volts peut fournir sans que le courant dépasse le maximum autorisé, qui est de 13 ampères . Dans les pays en 110 volts , il faut deux fois plus de temps pour faire bouillir de l'eau.

Si un foyer utilise sa bouilloire 20 minutes par jour, cela fait une consommation moyenne de puissance de **1 kWh par jour**. (Dans la suite du chapitre, quand je compterai « par foyer », je considérerai qu'il y a 2 personnes par foyer.)

Sur une cuisinière électrique, une petite plaque a la même puissance qu'un grille-pain : 1 kW . Les plaques les plus puissantes fournissent $2,3\text{ kW}$. Si on utilise deux des plaques de la cuisinière à pleine puissance pendant une demi-heure chaque jour, cela correspond à **1,6 kWh par jour**.



FIGURE 7.1. Un groupe de nouvelles maisons.

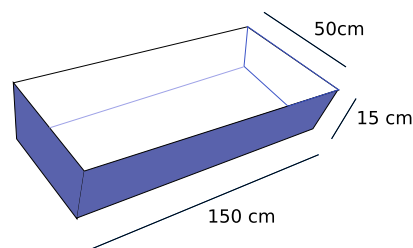


FIGURE 7.2. Le volume d'eau d'une baignoire.

$$230\text{ V} \times 13\text{ A} = 3\,000\text{ W}$$

Micro-ondes :
1 400 W crête

Réfrigérateur-
congélateur :
100 W en crête,
moyenne 18 W



FIGURE 7.3. Puissance consommée par un appareil de chauffage et un appareil de refroidissement.

Appareil	puissance	temps par jour	énergie par jour
Cuisiner			
– bouilloire	3 kW	1/3 h	1 kWh/j
– micro-ondes	1,4 kW	1/3 h	0,5 kWh/j
– plaques électriques	3,3 kW	1/2 h	1,6 kWh/j
– four électrique	3 kW	1/2 h	1,5 kWh/j
Nettoyer			
– lave-linge	2,5 kW		1 kWh/j
– sèche-linge	2,5 kW	0,8 h	2 kWh/j
– armoire de séchage			0,5 kWh/j
– corde à linge			0 kWh/j
– lave-vaisselle	2,5 kW		1,5 kWh/j
Refroidir			
– réfrigérateur	0,02 kW	24 h	0,5 kWh/j
– congélateur	0,09 kW	24 h	2,3 kWh/j
– climatiseur	0,6 kW	1 h	0,6 kWh/j

La puissance de cuisson d'un four à micro-ondes est généralement indiquée sur sa façade : sur le mien, il est écrit 900 W. Mais en fait, le four à micro-ondes *consomme* environ 1,4 kW. L'utiliser 20 minutes par jour consomme donc **0,5 kWh par jour**.

Un four traditionnel est plus gourmand : environ 3 kW à pleine puissance. Si on l'utilise chaque jour pendant une heure, dont la moitié du temps à pleine puissance, cela fait **1,5 kWh par jour**.

Vêtements chauds et assiettes chaudes

Un lave-linge, un lave-vaisselle, un sèche-linge consomment tous une puissance d'environ 2,5 kW lorsqu'ils fonctionnent.

Un lave-linge consomme environ 80 litres d'eau par charge, avec un coût en énergie d'environ 1 kWh en lavant à 40 °C. Si, pour faire sécher le linge, on utilise une armoire de séchage au lieu d'un sèche-linge, il faut toujours de la chaleur pour faire s'évaporer l'eau du linge— à peu près 1,5 kWh pour faire sécher une charge de linge, au lieu de 3 kWh.

Si on fait le total de toutes ces estimations liées à l'eau chaude, on arrive assez facilement à environ **12 kWh par jour et par personne**.

L'air chaud — à la maison et au travail

Alors, qu'est-ce qui exige le plus de puissance : de chauffer notre eau et nos aliments, ou de chauffer l'air via les radiateurs de nos bâtiments ?

Une des manières d'estimer la quantité d'énergie consommée par jour pour chauffer l'air est d'imaginer un bâtiment chauffé par des convecteurs électriques, parce que les puissances électriques nous sont plus fami-

TABLEAU 7.4. Consommation d'énergie des appareils ménagers utilisés pour chauffer et refroidir, par foyer.

Eau chaude :
12 kWh/j

FIGURE 7.5. La consommation de puissance totale pour l'eau chaude — à la maison et au travail — y compris pour se baigner, se doucher, laver le linge et la vaisselle, cuisiner, faire bouillir de l'eau et faire cuire au micro-ondes, est d'environ 12 kWh par jour et par personne. J'ai utilisé une couleur claire pour ce rectangle, pour indiquer que cette puissance peut être fournie par une source thermique de faible qualité.



FIGURE 7.6. Un gros radiateur électrique : 2 kW.

lières. La puissance d'un radiateur électrique, ventilé ou non, est de 1 kW (soit 24 kWh par jour). En hiver, on peut considérer qu'il en faut un par personne pour être à l'aise. En été, aucun. On peut donc estimer qu'en moyenne, un humain moderne a *besoin* de consommer 12 kWh par jour d'air chaud. Mais la plupart des gens en consomment plus qu'ils n'en ont besoin, et laissent plusieurs pièces chauffées en même temps (disons, la cuisine, le salon, le couloir, la salle de bains). Donc, un chiffre vraisemblable de la consommation d'air chaud est de l'ordre du double de ce chiffre : **24 kWh par jour et par personne**.

Le chapitre E, qui accompagne ce chapitre-ci, fait un compte plus détaillé de la manière dont un bâtiment consomme de la chaleur. Son modèle permet de prédire ce qu'on économisera en baissant le thermostat, en mettant des doubles vitrages aux fenêtres, etc.

Air chaud :
24 kWh/j

FIGURE 7.7. La consommation de puissance totale d'air chaud — à la maison et au travail — est de l'ordre de 24 kWh par jour et par personne.

Chauffer dehors, et autres luxes

On observe une tendance grandissante à chauffer l'air extérieur des terrasses. Ces chauffe-terrasses ont typiquement une puissance de 15 kW. En utiliser un tous les soirs pendant deux heures, consomme donc **30 kWh par jour** supplémentaires.

Un luxe plus modeste, c'est la couverture chauffante. Une couverture chauffante pour un lit double consomme 140 W ; son utilisation pendant une heure consomme donc **0,14 kWh**.

Refroidir

Réfrigérateur et congélateur

On ne fait pas que changer la température de l'eau et de l'air autour de nous. On change aussi la température de certaines armoires froides que l'on loge dans les serres qui nous servent de maisons. Mon réfrigérateur-congélateur, que l'on voit en figure 7.3, consomme en moyenne 18 W — soit environ 0,5 kWh/j.

Climatisation

Dans les pays dans lesquels la température dépasse 30 °C, la climatisation est vue comme une nécessité, et le coût en énergie de ce contrôle de la température peut être élevé. Toutefois, ce chapitre du livre parle de la consommation d'énergie en Grande-Bretagne, où les températures ne requièrent qu'un faible usage de la climatisation (figure 7.8).

Une manière économique de climatiser est d'utiliser une pompe à chaleur air-air. Un climatiseur d'air électrique pour une seule pièce, installé au niveau d'une fenêtre, consomme 0,6 kW d'électricité et (par échange de chaleur) fournit 2,6 kW de refroidissement. Pour estimer la quantité

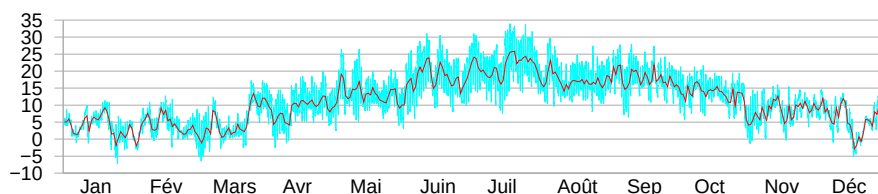


FIGURE 7.8. Températures moyennes à Cambridge en degrés Celsius, par jour (en rouge), et par demi-heure (en bleu), en 2006.

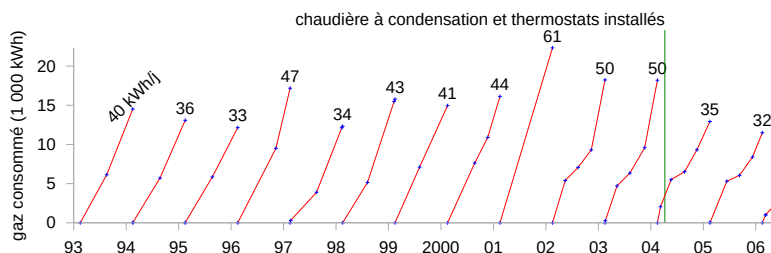


FIGURE 7.9. Ma consommation cumulée de gaz domestique, en kWh, année par année entre 1993 et 2005. Le chiffre au-dessus de chaque ligne rouge correspond au taux moyen de consommation en kWh par jour. Pour trouver ce qui s'est passé en 2007, poursuivez votre lecture !

d'énergie qu'une personne pourrait utiliser au Royaume-Uni pour la climatisation, j'ai supposé qu'elle l'allumerait environ 12 heures par jour pendant 30 jours par an. Durant les jours où il est allumé, le climatiseur consomme 7,2 kWh. La consommation moyenne sur l'année est donc de **0,6 kWh/j**.

L'estimation que ce chapitre fait du coût en énergie du refroidissement — 1 kWh/j par personne — inclut cette climatisation et l'usage d'un réfrigérateur domestique. Notre société fait aussi appel à la réfrigération entre la ferme et le panier de la ménagère. Nous ferons une estimation de ce coût énergétique de la chaîne alimentaire plus loin, au chapitre 15.

La consommation totale de puissance pour chauffer et refroidir

Notre estimation grossière de la puissance totale qu'une personne pourrait consommer pour chauffer et refroidir (y compris à la maison, sur le lieu de travail, et pour faire la cuisine) est de **37 kWh/j par personne** (12 pour l'eau chaude, 24 pour l'air chaud, et 1 pour le refroidissement).

La preuve que cette estimation est dans la bonne fourchette, ou peut-être un peu en dessous, vient de ma propre consommation de gaz de ville, qui, sur 12 ans, a été en moyenne de 40 kWh par jour (figure 7.9).

A l'époque, je me croyais un consommateur de chauffage assez frugal, mais je ne faisais pas très attention à ma consommation réelle de puissance. Le chapitre 21 révélera les économies que j'ai pu réaliser en commençant à y faire vraiment attention.

Puisque le chauffage est un élément important de notre pile de consommation, essayons de vérifier nos estimations en les confrontant à quelques statistiques nationales. À l'échelle de la Grande-Bretagne, la consommation

Refroidiss. : **1 kWh/j**



FIGURE 7.10. La consommation de puissance totale pour refroidir — y compris un réfrigérateur-congélateur et un petit climatiseur d'appoint pour l'été — 1 kWh/j.

moyenne *domestique* pour le chauffage, l’eau et la cuisine en l’an 2000 était de 21 kWh par jour et par personne ; la consommation du *secteur des services* pour le chauffage, le refroidissement, la restauration, et l’eau chaude était de 8,5 kWh/j par personne. Pour une estimation du chauffage sur le lieu de travail, on peut prendre la consommation de gaz de l’université de Cambridge en 2006–2007 : 16 kWh/j par employé.

En faisant le total de ces trois chiffres, une seconde estimation de la consommation nationale est de $21 + 8,5 + 16 \simeq 45$ kWh/j par personne, en supposant que l’Université de Cambridge ne soit pas un lieu de travail atypique. Bon, voilà qui est rassurant : ce chiffre est assez proche de notre première estimation de 37 kWh/j.

Notes et bibliographie

Page n°

- 60 *Un four consomme 3 kW.* Évidemment, il y a tout une gamme de puissances. De nombreux fours ont une puissance maximale de 1,8 kW ou 2,2 kW. Certains fours haut de gamme consomment jusqu’à 6 kW. Par exemple, la cuisinière Whirlpool AGB 487/WP 4 inclut un four de 5,9 kW, et quatre plaques de cuisson de 2,3 kW.
www.kcmltd.com/electric_oven_ranges.shtml
www.1stforkitchens.co.uk/kitchenovens.html
- *Une armoire de séchage requiert environ 1,5 kWh pour sécher une charge de linge.* J’ai trouvé ce résultat en pesant le linge que je lavais : une charge de linge, 4 kg une fois sec, sortait de ma machine à laver Bosch en pesant 2,2 kg de plus (même après un bon essorage germanique). La chaleur latente de vaporisation de l’eau à 15 °C est d’environ 2 500 kJ/kg. Pour obtenir le chiffre par jour montré par le tableau 7.4, j’ai supposé qu’une personne faisait une lessive tous les trois jours, et que le séchage de ce linge absorbait la précieuse chaleur de la maison durant la moitié la plus froide de l’année. (En été, l’armoire de séchage fournit un peu de climatisation, puisque l’évaporation de l’eau provoque un léger rafraîchissement de l’air dans la maison.)
- 63 *Au niveau national, la consommation moyenne domestique était de 21 kWh/j/pers ; la consommation du secteur des services était de 8,5 kWh/j/pers.* Source : Department of Trade and Industry (2002a).
- *En 2006–2007, la consommation de gaz de l’université de Cambridge était de 16 kWh/j par employé.* La consommation de gaz et de pétrole de l’université de Cambridge (sans compter les « Colleges », leurs salles de cours et leurs résidences étudiantes) était de 76 GWh en 2006–2007. J’ai annoncé que 13 300 personnes y travaillaient (8 602 employés et 4 667 chercheurs de troisième cycle). Soit dit en passant, sa consommation d’électricité était de 99,5 GWh. Source : rapport des services de l’université.

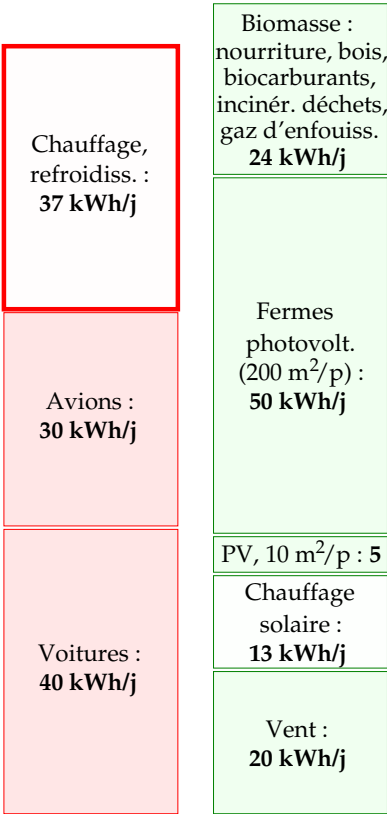


FIGURE 7.11. Chauffer et refroidir — Environ 37 unités par jour et par personne. J’ai supprimé l’ombrage de ce rectangle pour indiquer que la puissance correspondante peut être fournie par une source thermique de faible qualité.

8 Hydroélectricité

Pour obtenir de la puissance hydroélectrique, il vous faut de l'altitude, et il vous faut des précipitations. Faisons une estimation de l'énergie potentielle pouvant être produite par toute la pluie qui s'écoule jusqu'à la mer. Pour établir cette prévision hydroélectrique, je vais diviser la Grande-Bretagne en deux : la partie plus basse et plus sèche, que je vais appeler les « basses-terres » et la partie plus élevée et plus humide, que je vais appeler les « hautes-terres ». Les deux lieux que je vais choisir comme représentatifs de chacune de ces régions sont Bedford et Kinlochewe.

Voyons tout d'abord les basses-terres. Pour obtenir une estimation de la puissance gravitationnelle de la pluie des basses-terres, il nous faut multiplier les précipitations à Bedford (584 mm par an) par la densité de l'eau (1000 kg/m^3), la force de gravité terrestre (10 m/s^2) et l'altitude typique au dessus de la mer des basses-terres (disons, 100 m). La puissance par unité de surface est alors de $0,02 \text{ W/m}^2$. Cela correspond à la puissance par unité de surface de basses-terres sur laquelle de la pluie tombe.

Lorsqu'on la multiplie par la superficie par personne ($2\,700 \text{ m}^2$, si les basses-terres sont réparties de manière équitable entre tous les 60 millions de Britanniques), on trouve une puissance moyenne brute absolue d'environ 1 kWh par jour et par personne. C'est la limite supérieure absolue de puissance hydroélectrique dans les basses-terres, si absolument toutes les rivières étaient retenues par des barrages, et si chaque goutte de pluie y était exploitée de manière parfaite. En réalité, on ne construira de barrages que sur les rivières présentant un dénivelé suffisamment important, et les bassins hydrographiques de ces rivières sont bien plus petits que le pays.

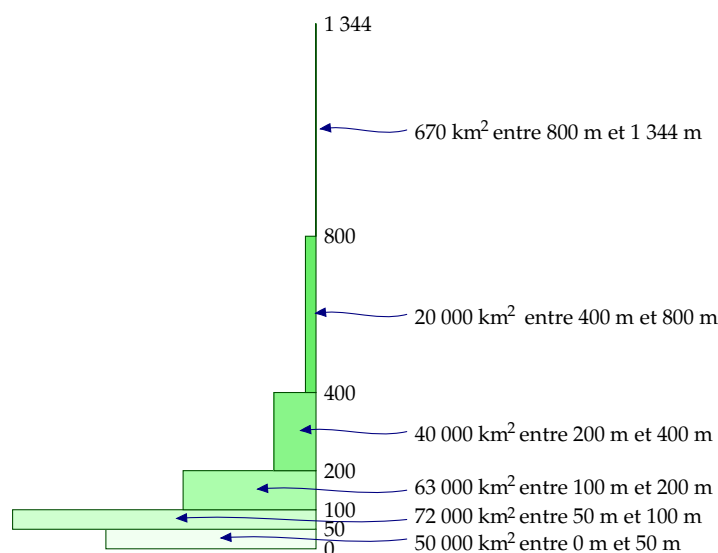


FIGURE 8.1. Barrage de Nant-y-Moch, faisant partie d'un aménagement hydroélectrique de 55 MW au Pays de Galles. Photographie de Dave Newbould, www.origins-photography.co.uk. Permission accordée pour la version Web, mais pas la version imprimée (mercredi 22/08/2007)



FIGURE 8.2. Altitudes en Grande-Bretagne. Les rectangles montrent la superficie couverte par chaque étage du territoire.

Aucun système hydroélectrique ne peut exploiter l'intégralité du potentiel énergétique de l'eau, parce qu'avant d'atteindre la moindre turbine, l'essentiel de cette eau s'est évaporée. On arrive donc à une conclusion solide au sujet de la puissance de l'eau des basses-terres : les gens peuvent s'amuser à faire de l'hydroélectricité « au fil de l'eau » ou d'autres plans de petit hydroélectrique, mais de telles installations ne fourniront jamais plus de 1 kWh par jour par personne.

Tournons-nous maintenant vers les « hautes-terres ». Kinlochewe, en Écosse, est un endroit nettement plus arrosé : il y tombe 2 278 mm de précipitations par an, soit quatre fois plus qu'à Bedford. Les dénivelés sont eux aussi plus importants — une grande partie des hautes-terres est située au-dessus de 300 m d'altitude. Dans l'ensemble, l'estimation selon laquelle la puissance par mètre carré est douze fois supérieure dans les hautes-terres que dans les basses-terres est plausible. Dans ces conditions, la puissance brute par unité de surface est d'environ 0,24 W/m². En supposant que les hautes-terres partagent généreusement leur puissance hydraulique avec le reste du Royaume-Uni (avec 1 300 m² par personne), on trouve une limite maximale d'environ 7 kWh par jour et par personne. Comme pour les basses-terres, il s'agit d'une limite supérieure pour la puissance brute que l'on peut obtenir, en supposant qu'il n'y a aucune évaporation et que chaque goutte est parfaitement exploitée.

En pratique, à combien peut-on estimer la limite plausible ? Sans doute 20 % de cette valeur — soit 1,4 kWh par jour, que l'on va arrondir pour y ajouter un peu de production venant des basses-terres : on obtient **1,5 kWh par jour**.

La puissance réelle que l'on obtient aujourd'hui de l'hydroélectricité au Royaume-Uni est de 0,2 kWh/j par personne. Pour passer à 1,5 kWh/j par personne, il faudrait donc multiplier par sept cette production de puissance hydroélectrique.

Notes et bibliographie

Page n°

- 64 *Précipitations.* Les statistiques proviennent du centre météo de la BBC.
- 65 *La puissance brute par unité de surface [de pluie sur les hautes terres] est d'environ 0,24 W/m².* On peut vérifier cette estimation en la confrontant à la densité de puissance réelle de l'installation hydroélectrique du Loch Sloy, achevée en 1950 (Ross, 2008). Le bassin hydrologique du Loch Sloy est d'environ 83 km² ; les précipitations y sont d'environ 2 900 mm par an (un peu plus que les 2 278 mm/an de Kinlochewe), et la production d'électricité en 2006 y a été de 142 GWh par an, ce qui correspond à une densité de puissance de 0,2 W/m² de bassin hydrologique. La surface du Loch Sloy étant d'environ 1,5 km², la puissance produite par la centrale hydroélectrique par mètre carré de lac est donc de 11 W/m². Les versants, les conduites forcées et

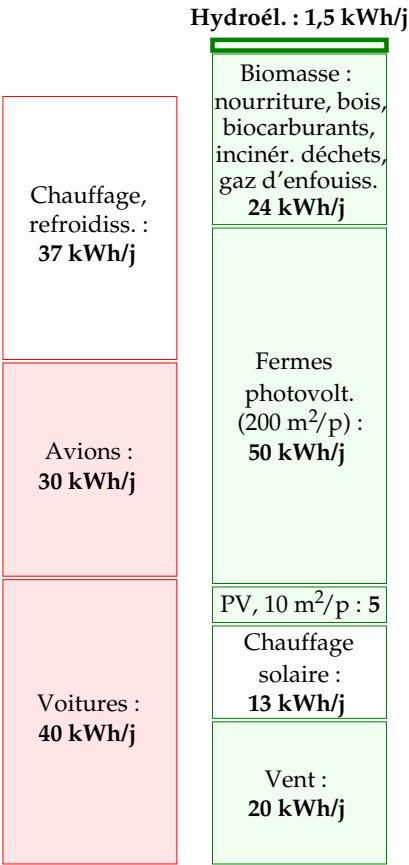


FIGURE 8.3. Hydroélectricité.

les tunnels qui acheminent l'eau jusqu'au loch se comportent donc comme un concentrateur à multiplication de puissance égal à 55.

- 65 *La puissance réelle provenant de l'hydroélectricité au Royaume-Uni est aujourd'hui de 0,2 kWh/j par personne.* Source : MacLeay et al. (2007). En 2006, le grand hydroélectrique a produit 3 515 GWh (à partir d'un parc de centrales d'une capacité cumulée de 1,37 GW) ; le petit hydroélectrique a produit 212 GWh (soit 0,01 kWh/j/pers) (à partir d'un parc d'une capacité cumulée de 153 MW). En 1943, lorsque la croissance de l'hydroélectricité battait son plein, les ingénieurs du North of Scotland Hydroelectricity Board estimaient que les Highlands d'Écosse permettraient de produire 6,3 TWh par an répartis sur 102 centrales — ce qui correspondrait à 0,3 kWh/j par personne pour le Royaume-Uni (Ross, 2008).

Glendoe, le premier projet hydroélectrique de grande taille au Royaume-Uni depuis 1957, ajoutera 100 MW de capacité, et on s'attend à ce qu'il produise 180 GWh par an. Le bassin hydrologique de Glendoe a une superficie de 75 km² ; on peut donc en déduire sa densité de puissance : 0,27 W/m² de bassin hydrologique. Glendoe a été présenté par certains comme « suffisamment important pour alimenter Glasgow ». Mais si on partage ses 180 GWh par an entre tous les habitants de Glasgow (616 000 habitants), on n'obtient que 0,8 kWh/j par personne. C'est à peine 5 % de la consommation moyenne d'électricité, qui est de 17 kWh/j par personne. Cette exagération d'un facteur 20 est due au fait que ces commentateurs se sont concentrés sur la production *en crête* de Glendoe plutôt que sur sa production *moyenne* sur l'année, qui est 5 fois plus faible ; et en parlant de « nombre de foyers » au lieu de parler de puissance électrique totale consommée par Glasgow (voir page 387).



FIGURE 8.4. Une roue à aubes de 60 kW.

9 Lumière

S'éclairer à la maison et au travail

Les ampoules électriques les plus puissantes de la maison consomment 250 W, et les lampes de chevet 40 W. Dans les vieilles ampoules à incandescence, l'essentiel de la puissance se transforme en chaleur plutôt qu'en lumière. Un tube fluorescent peut produire autant de lumière qu'une ampoule à incandescence en utilisant un quart de sa puissance.

Combien de puissance une personne moyennement riche peut-elle utiliser pour s'éclairer? Mon estimation grossière, selon le tableau 9.2, est qu'un ménage typique de deux personnes, avec un mélange d'ampoules haute et basse consommation, consomme environ 5,5 kWh par jour, soit 2,7 kWh par jour par personne. Je suppose que chaque personne a également un lieu de travail où elle partage un éclairage similaire avec ses collègues; si le lieu de travail consomme 1,3 kWh/j par personne, on obtient le chiffre de **4 kWh/j par personne**.

L'éclairage public et les feux de circulation

Faut-il vraiment prendre en compte aussi l'éclairage public pour obtenir une estimation fidèle, ou est-ce que la maison et le travail dominent le budget lumière? En fait, l'éclairage public consomme environ 0,1 kWh par jour et par personne, et les feux de circulation seulement 0,005 kWh/j par personne — tous deux négligeables par rapport à notre éclairage personnel à la maison et au travail. Qu'en est-il des autres formes d'éclairage public — les enseignes et autres bornes lumineuses, par exemple? Il y en a moins que de lampadaires publics, et nous avons déjà vu que ceux-ci ne comptaient que pour peu. Nous n'avons donc pas besoin de modifier notre estimation globale de 4 kWh/j par personne.

Feux de croisement des voitures

Dans certains pays, tous les conducteurs doivent allumer leurs feux de croisement, de jour comme de nuit, dès qu'ils roulent. A combien se monte la puissance supplémentaire qu'impose cette réglementation, comparée à la puissance qu'il faut pour faire rouler la voiture? Disons que la voiture

Ampoules	Puissance	Durée par jour	Énergie par jour par foyer
10 ampoules incandesc.	1 kW	5 h	5 kWh
10 ampoules basse-cons.	0,1 kW	5 h	0,5 kWh

Hydroélectr. : 1,5 kWh/j

Lumière : 4	Biomasse : nourriture, bois, biocarburants, incinér. déchets, gaz d'enfouiss. 24 kWh/j
Chauffage, refroidiss. : 37 kWh/j	Fermes photovolt. (200 m ² /p) : 50 kWh/j
Avions : 30 kWh/j	PV, 10 m ² /p : 5
Voitures : 40 kWh/j	Chauffage solaire : 13 kWh/j
	Vent : 20 kWh/j

FIGURE 9.1. Éclairage — 4 kWh par jour et par personne.

TABLEAU 9.2. Consommation électrique pour l'éclairage domestique. Un total plausible est de 5,5 kWh par jour et par foyer. On trouve un chiffre similaire pour le lieu de travail, sans doute autour de 4 kWh par jour et par personne.

dispose de quatre ampoules à incandescence, d'une puissance cumulée de 100 W. L'électricité consommée par ces ampoules est fournie par un moteur dont le rendement est de 25 %, qui, lui-même, alimente un générateur avec un rendement de 55 %. La puissance requise est donc de **730 W**. A titre de comparaison, une voiture-type, qui roule à une vitesse moyenne de 50 km/h et qui consomme 8 litres aux 100 km, consomme en moyenne **42 000 W**. Avoir ses feux allumés en permanence en roulant requiert donc 2 % de puissance supplémentaire.

Qu'en est-il des futures voitures électriques ? La consommation de puissance d'une voiture électrique typique est d'environ 5 000 W. Donc ajouter 100 W de plus augmenterait la consommation de 2 %. La surconsommation de puissance serait plus faible en utilisant des feux à LED, mais si on fait un peu plus attention à ce sujet, on va arriver à un cas sévère du fameux syndrome « chaque-petit-geste-compte ».

L'économie des lampes basse-consommation

En général, j'évite de discuter les aspects économiques, mais je voudrais faire une exception pour les lampes basse-consommation. Osram annonce que son ampoule basse-consommation de 20 W éclaire autant qu'une ampoule à incandescence de 100 W, et que sa durée de vie est de 15 000 heures (ou « 12 ans », avec 3 heures d'allumage par jour). Alors qu'une ampoule à incandescence classique dure jusqu'à 1 000 heures. Ainsi, sur une période de 12 ans, vous avez le choix (figure 9.3) : soit vous achetez 15 ampoules à incandescence et 1 500 kWh d'électricité (ce qui coûte environ 130 euros, si l'électricité coûte 8 centimes d'euro le kWh), soit vous achetez une ampoule basse-consommation et 300 kWh d'électricité (soit un peu moins de 40 euros). Et plus le kWh électrique coûte cher, plus la différence de coût augmente.

Dois-je attendre que ma vieille ampoule claque avant de la remplacer ?

On dirait du gâchis, non ? Il a fallu du temps et de l'argent pour fabriquer la vieille ampoule à incandescence. Ne faut-il pas plutôt rentabiliser l'investissement initial en utilisant la lampe jusqu'à ce qu'elle soit morte ? La réponse économique est claire : *continuer à utiliser une vieille ampoule à filament, c'est jeter de l'argent par les fenêtres*. Si vous trouvez une ampoule basse-consommation qui peut remplacer votre vieille ampoule à incandescence, achetez-la et utilisez-la tout de suite à la place de l'ancienne.

Et le mercure des ampoules basse-consommation ? Ne faut-il pas préférer les ampoules à LED ?

Selon les chercheurs, les ampoules à LED (diodes électroluminescentes) seront bientôt encore plus économes en énergie que les ampoules basse-consommation. L'efficacité d'une lumière se mesure en *lumens par watt*. J'ai regardé les chiffres sur mes derniers achats : l'ampoule fluo-compacte

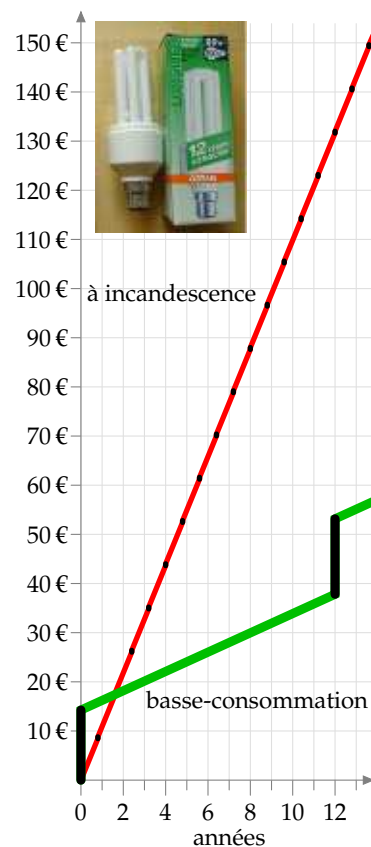


FIGURE 9.3. Coût total cumulé en utilisant une ampoule à incandescence traditionnelle de 100 W pendant 3 heures par jour, comparé à celui qu'impose son remplacement immédiat par une ampoule Osram Dulux Longlife Energy Saver (photo). On suppose ici que l'électricité coûte 0,08 euro par kWh, qu'une ampoule traditionnelle coûte 0,70 euro et que l'ampoule basse-consommation coûte 14 euros. (Je sais qu'on peut les trouver à moins de 14 euros, mais ce graphique montre que même à 14 euros, elles restent intéressantes sur le plan économique.)

Philips Genie 11 W (figure 9.4) a une luminosité de 600 lumens, ce qui lui donne un rendement de **55 lumens par watt** ; les ampoules à incandescence classiques fournissent **10 lumens par watt** ; l’ampoule Omicron de 1,3 W, composée de 20 LED blanches cachées à l’intérieur, a une luminosité de 46 lumens, ce qui fait un rendement de **35 lumens par watt**. Donc, cette ampoule à LED est presque aussi efficace que l’ampoule fluorescente. Mais l’industrie des LED a encore quelques efforts à faire. L’ampoule à LED a pour elle sa durée de vie de 50 000 heures, c’est-à-dire huit fois celle de l’ampoule fluorescente. Au moment où j’écris ces lignes, www.cree.com vend des LED annoncées avec une puissance de **100 lumens par watt**. On s’attend à ce qu’à l’avenir, les LED blanches aient un rendement de plus de 150 lumens par watt [ynjzɛj]. Et à mon avis, dans quelques années, le meilleur conseil que l’on puisse donner, aussi bien du point de vue de l’efficacité énergétique que pour éviter la pollution au mercure, sera d’utiliser des ampoules à LED.

Légendes urbaines

« Ça ne sert à rien d'utiliser des lampes basse-consommation. L'énergie qu'elles "gaspillent" sous forme de chaleur sert à chauffer ma maison, donc ce n'est pas perdu. »

Je parle de cette légende dans le chapitre 11, page 82.

Notes et bibliographie

Page n°

- 67 *L'éclairage public consomme 0,1 kWh par jour et par personne...* Dans les rues, il y a environ un lampadaire au sodium pour 10 personnes. L’ampoule de chaque lampadaire a une puissance de 100 W, et elle est allumée 10 heures par jour. Cela fait 0,1 kWh par jour et par personne.
- *... et les feux de circulation seulement 0,005 kWh/j par personne.* La Grande-Bretagne possède 420 000 feux de circulation, qui consomment 100 millions de kWh d’électricité par an. Partagés entre les 60 millions d’habitants, 100 millions de kWh par an correspondent à 0,005 kWh/j par personne.
- *Il y a moins de bornes et d’enseignes lumineuses que de lampadaires publics.* [www.highwayelectrical.org.uk]. Au Royaume-Uni, il y a 7,7 millions d’unités lumineuses (éclairage urbain, signes lumineux, enseignes et bornes lumineuses), dont environ 7 millions sont des lampadaires publics, et 1 million sont des panneaux routiers lumineux. Il y a 210 000 feux de circulation. Selon DUKES 2005, la puissance totale de l’éclairage public est 2 095 GWh/an, ce qui fait 0,1 kWh par jour et par personne.
- 68 *Un générateur avec un rendement de 55 %* – source : en.wikipedia.org/wiki/Alternator. Les générateurs des centrales électriques ont un rendement bien meilleur pour convertir le travail mécanique en électricité.



FIGURE 9.4. Ampoule Philips de 11 W à côté d’une ampoule à LED de 1,3 W.

Ampoule	Rendement (lumens/W)
incandescente	10
halogène	16–24
LED blanches	35
fluo-compactes	55
large fluorescentes	94
vapeur de sodium	150

TABLEAU 9.5. Rendement d’éclairage d’ampoules disponibles dans le commerce. A l’avenir, on s’attend à ce que les LED blanches atteignent 150 lumens par watt.

10 Vent en mer

Le parc éolien en mer de London Array apportera une contribution cruciale pour répondre aux objectifs de développement des énergies renouvelables que le Royaume-Uni s'est fixés.

James Smith, président de Shell UK

L'électricité est quelque chose de trop vital pour être utilisé comme un simple plan de création d'emplois pour l'industrie éolienne.

David J. White

En mer, les vents sont plus forts et plus réguliers que sur terre. Les parcs éoliens offshore offrent donc plus de puissance par unité de surface que sur terre. Le parc éolien de Kentish Flats, situé dans l'estuaire de la Tamise, à environ 8,5 km au large de Whitstable et Herne Bay, et mis en service fin 2005, devait fournir une puissance moyenne par unité de surface de $3,2 \text{ W/m}^2$. En 2006, la puissance moyenne par unité de surface qu'elle a effectivement délivrée a été de $2,6 \text{ W/m}^2$.

Je vais supposer qu'une puissance par unité de surface de 3 W/m^2 (50 % de plus que notre estimation pour l'éolien terrestre, qui était de 2 W/m^2) est un chiffre correct pour les parcs éoliens offshore tout autour du Royaume-Uni.

Il nous faut maintenant une estimation de la surface de mer qui pourrait, de manière plausible, être recouvertes d'éoliennes. Il est classique de faire la distinction entre les éoliennes en mer *peu profonde* et les éoliennes en mer *profonde*, comme l'illustre la figure 10.2. Il est communément admis que les projets d'éoliennes en mer *peu profonde* (moins de 25 à 30 mètres de profondeur) sont économiquement faisables moyennant de modestes subsides, même si, en gros, ils coûtent deux fois plus cher que les projets terrestres, alors qu'à l'heure actuelle, les projets d'éoliennes en mer *profonde* ne sont économiquement pas rentables. En 2008, il n'existait qu'un seul parc éolien en mer profonde installé dans les eaux britanniques : il s'agissait d'un prototype expérimental qui envoyait toute son électricité à une plate-forme pétrolière voisine appelée Beatrice.

Éoliennes en mer peu profonde

Dans les eaux territoriales britanniques, la zone d'eau peu profonde couvre environ $40\,000 \text{ km}^2$, dont la plus grande partie se trouve au large des côtes anglaises et galloises. Cette surface correspond à environ deux fois le Pays de Galles.

Si des fermes éoliennes en mer peu profonde occupaient l'intégralité de cette surface, la puissance moyenne disponible serait de 120 GW, soit 48 kWh par jour et par personne. Mais on imagine difficilement qu'une telle étendue de parcs éoliens puisse être totalement compatible avec la



FIGURE 10.1. Kentish Flats — un parc éolien en mer peu profonde. Chaque rotor a un diamètre de 90 mètres dont l'axe est situé à 70 mètres de haut. Chacune des turbines de « 3 MW » pèse 500 tonnes, dont la moitié pour ses fondations.

Photos © Elsam (elsam.com).
Reproduit avec autorisation.

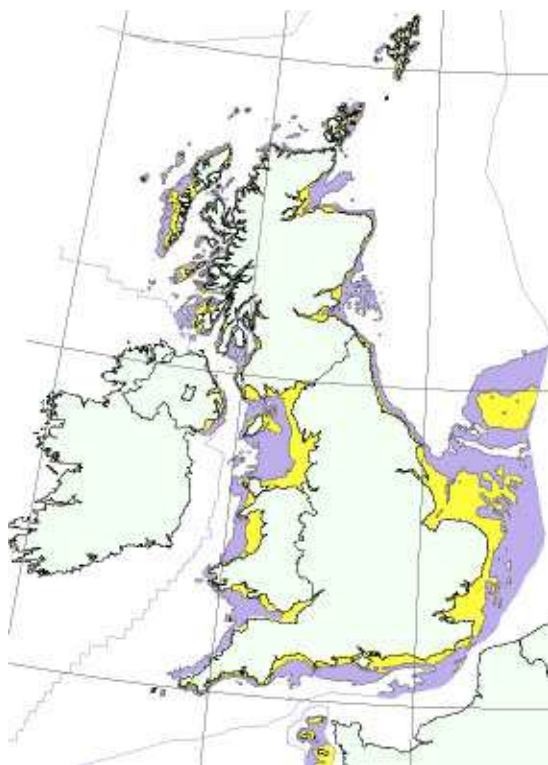
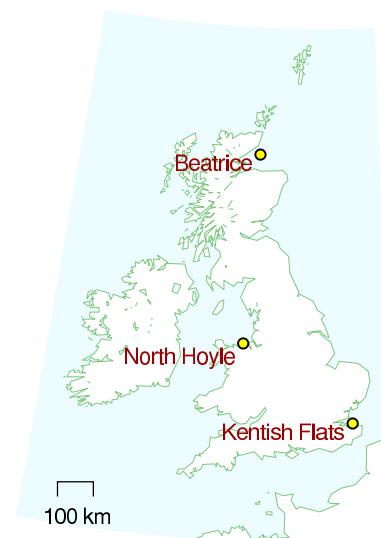


FIGURE 10.2. Les eaux territoriales britanniques dont la profondeur n'excède pas 25 mètres (en jaune) ou est comprise entre 25 et 50 mètres (en violet). Les données proviennent de l'Atlas des ressources marines renouvelables du ministère britannique du commerce et de l'industrie. © Copyright de la couronne britannique.



navigation. Une importante partie de ces eaux ne ferait, j'en suis sûr, pas l'objet de champs d'éoliennes. Le besoin de créer des couloirs de navigation et des zones de pêche réduira à coup sûr les surfaces disponibles ; aussi je propose de faire l'hypothèse qu'un tiers seulement de cette surface puisse être comptée comme réellement utilisable (mais si vous lisez les notes de fin de chapitre, vous trouverez une estimation encore plus pessimiste !). On peut alors estimer la puissance maximale plausible qu'il est possible d'obtenir de l'éolien en mer peu profonde à **16 kWh/j par personne**.

Avant de poursuivre, je voudrais insister sur l'énorme surface qu'il faudrait — deux tiers du Pays de Galles — pour pouvoir fournir ces 16 kWh/j par personne. Si on prenait la totalité du littoral britannique (longueur : 3 000 kilomètres), et qu'on alignait des turbines le long de cette côte sur 4 kilomètres de large, cette bande aurait une superficie de 13 000 km². C'est la surface qu'il faudrait recouvrir d'éoliennes pour fournir 16 kWh/j par personne. Regardons cela autrement : pour fournir une telle puissance, ce sont 44 000 turbines de « 3 MW » qu'il faudrait installer, ce qui fait 15 turbines par kilomètre de côte, si on les espace régulièrement le long des 3 000 kilomètres de côtes.

Le vent en mer est difficile à récupérer à cause des effets corrosifs de l'eau de mer. Les 80 turbines du grand parc éolien de Horns Reef au Da-

nemark ont dû être démontées et réparées après seulement 18 mois d'exposition à l'air marin. Les turbines de Kentish Flats semblent avoir des problèmes similaires avec leurs boîtes de vitesses : un tiers d'entre elles a dû être remplacé au cours des 18 premiers mois.

Éoliennes en mer profonde

La zone maritime dont la profondeur est comprise entre 25 et 50 mètres a une superficie d'environ 80 000 km² — c'est-à-dire la taille de l'Écosse. En faisant de nouveau l'hypothèse d'une puissance par unité de surface de 3 W/m², les parcs éoliens en mer « profonde » pourraient fournir 240 GW de plus, soit 96 kWh par jour et par personne, si cette zone était entièrement recouverte de turbines. Là encore, il faudra encore prévoir des couloirs de navigation pour les bateaux. Et comme précédemment, je suggère de ne compter qu'un tiers de cette surface réellement utilisable pour les parcs éoliens. La zone serait alors environ 30 % plus grande que le pays de Galles, et une grande partie se situerait à plus de 50 kilomètres des côtes. Ce qui signifie que si une bande de 9 kilomètres de large tout au long de la côte était couverte d'éoliennes, l'éolien en mer profonde pourrait fournir une puissance de **32 kWh/j par personne**. Une puissance énorme, c'est vrai. Mais sans commune mesure avec notre énorme consommation. Et nous n'avons pas parlé du problème de l'intermittence du vent. Nous y reviendrons au chapitre 26.

Je vais inclure la contribution potentielle de l'éolien en mer profonde dans la pile de production, avec la condition, comme je le disais précédemment, que les experts de l'éolien considèrent son coût comme prohibitif.

Quelques comparaisons et coûts

Alors, où en est notre course entre production et consommation ? Après avoir ajouté l'éolien en mer profonde et peu profonde à la pile de production, la pile verte a une nette longueur d'avance. Ceci dit, il y a quelque chose que je voudrais toutefois vous faire remarquer en regardant cette course, en l'occurrence, ce contraste : autant il est *facile* de jeter une bûche encore plus grosse sur le feu de la consommation, mais ô combien il est *difficile* de faire grossir la pile de production. Au moment où j'écris ces lignes, j'ai un peu froid, et je vais me lever pour monter un peu le thermostat. Il est si simple pour moi de consommer 30 kWh par jour de plus. Mais presser les renouvelables pour en extraire 30 kWh par jour de plus oblige à industrialiser l'environnement de manière si vaste que ça en devient difficile à imaginer.

Pour que l'éolien offshore au Royaume-Uni produise 48 kWh par jour et par personne, il faudrait **60 millions de tonnes de béton et d'acier** — une tonne par personne. La production mondiale d'acier est d'environ 1 200 millions de tonnes par an, c'est-à-dire 0,2 tonne par personne dans le

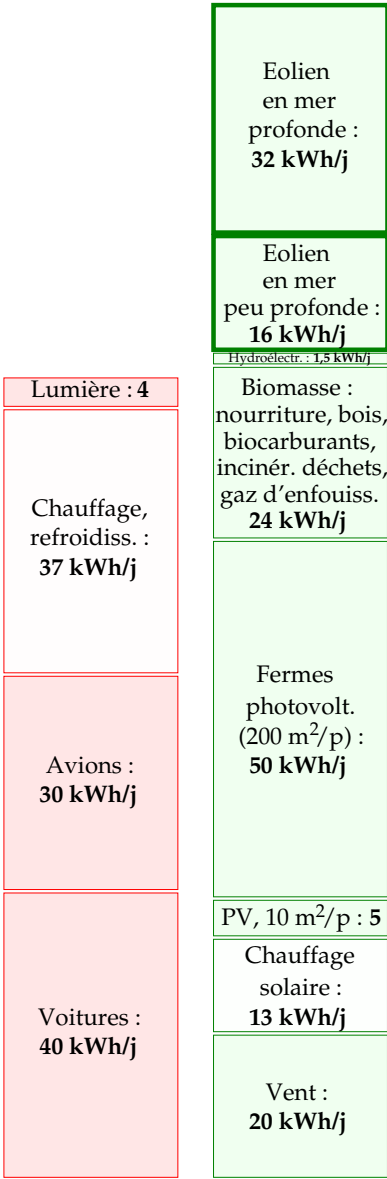


FIGURE 10.3. L'éolien en mer.

monde. Au cours de la Seconde Guerre mondiale, les chantiers navals américains construisirent 2 751 « Liberty ships », contenant chacun 7 000 tonnes d'acier — soit un total de 19 millions de tonnes d'acier, ou encore 0,1 tonne par Américain. La construction de 60 millions de tonnes d'éoliennes n'est donc pas quelque chose de totalement infaisable. Mais ne vous racontez pas d'histoires en pensant que ce sera facile. Fabriquer un tel nombre d'éoliennes sera un défi aussi titanesque que la construction des « Liberty ships ».

A titre de comparaison, produire 48 kWh par jour et par personne à partir de l'énergie nucléaire au Royaume-Uni nécessiterait **8 millions de tonnes d'acier** et **140 millions de tonnes de béton**. On peut également comparer les 60 millions de tonnes de matériel pour l'éolien offshore que nous essayons d'imaginer, à la quantité de matériel offshore effectivement implanté dans et autour de la mer du Nord pour exploiter les combustibles fossiles (figure 10.4). En 1997, 200 installations et 7 000 kilomètres de pipelines localisés dans les eaux britanniques de la mer du Nord, contenaient **8 millions de tonnes d'acier et de béton**. La construction récente du gazoduc Langeled entre la Norvège et la Grande-Bretagne, destiné à transporter 25 GW (10 kWh/j/pers) de gaz, a nécessité **1 million de tonnes d'acier** et **1 million de tonnes de béton** supplémentaires (figure 10.5).

Le gouvernement britannique a annoncé le 10 décembre 2007 qu'il autoriserait la création d'un parc éolien offshore d'une capacité de 33 GW (fournissant en moyenne 10 GW au Royaume-Uni, soit 4,4 kWh par jour par personne), plan qualifié de « promesse en l'air » par certains au sein de l'industrie éolienne. Promesse en l'air ? Voyons cela en partant du chiffre rond de 4 kWh par jour et par personne. Cela fait un quart de notre estimation de 16 kWh par jour et par personne à laquelle nous sommes arrivés pour l'éolien en mer peu profonde. Pour obtenir une telle puissance moyenne, il faut environ 10 000 éoliennes de « 3 MW » comme celles que montre la figure 10.1. (Elles ont une capacité de « 3 MW » mais en moyenne, elles ne fournissent que 1 MW. Je mets « 3 MW » entre guillemets pour indiquer que cette capacité correspond à une puissance en crête.)

Combien ça coûterait, d'ériger ces « 33 GW » ? Eh bien, puisque les « 90 MW » du parc de Kentish Flats ont coûté 105 millions de livres (126 millions d'euros), « 33 GW » devraient donc coûter environ 350 fois plus, c'est-à-dire dans les 33 milliards de livres (40 milliards d'euros). Ce coût de 40 milliards d'euros, pour des éoliennes offshore qui fournissent 4 kWh/j par personne, c'est un montant énorme, alors rendons-le plus clair en le partageant entre tous les habitants du pays : cela fait 660 euros par personne. Un investissement qui, soit dit en passant, est une bien meilleure affaire que les micro-turbines. Actuellement, une micro-turbine installée sur un toit coûte environ 1 500 livres (1 800 euros) et même avec une vitesse de vent très optimiste de 6 m/s, elle ne fournit que 1,6 kWh/j. En réalité, dans une zone urbaine typique en Angleterre, de telles micro-turbines ne fournissent que 0,2 kWh par jour.



FIGURE 10.4. La plate-forme Magnus dans le secteur britannique nord de la mer du Nord, contient 71 000 tonnes d'acier. En l'an 2000, cette plate-forme a fourni 3,8 millions de tonnes de pétrole et de gaz — soit une puissance de 5 GW. La plate-forme a coûté 1,1 milliards de livres sterling (1,3 milliards d'euros). Photos par Terry Cavern.



FIGURE 10.5. De la tuyauterie pour le gazoduc Langeled. Fourni par Bredero-Shaw [brederoshaw.com].

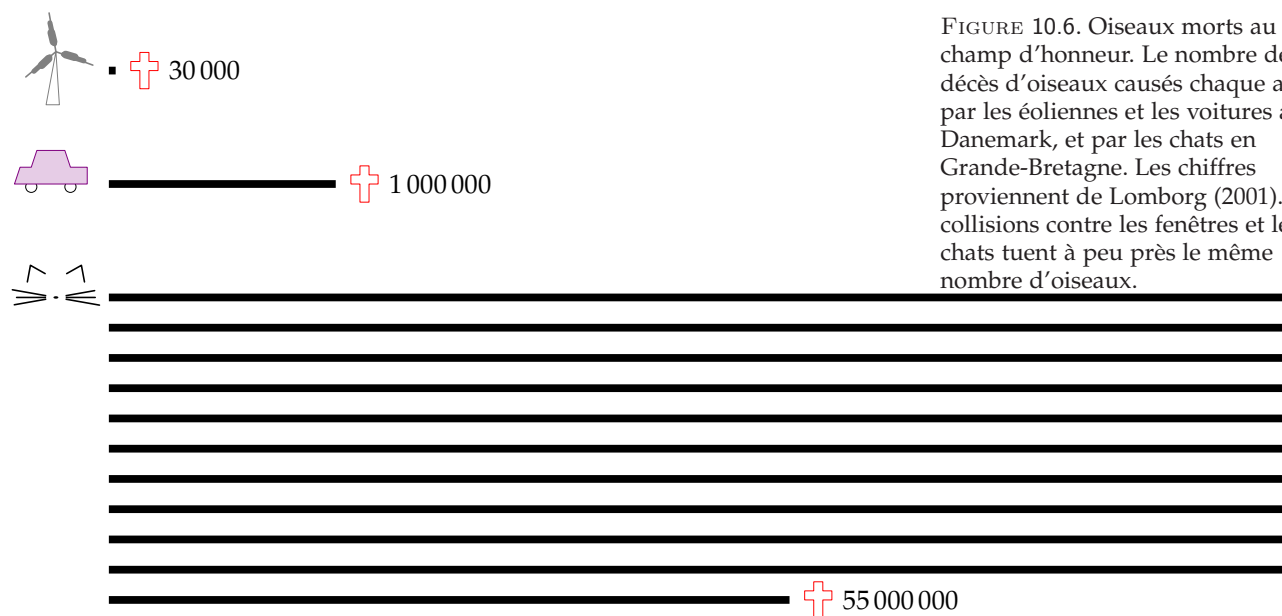


FIGURE 10.6. Oiseaux morts au champ d'honneur. Le nombre de décès d'oiseaux causés chaque année par les éoliennes et les voitures au Danemark, et par les chats en Grande-Bretagne. Les chiffres proviennent de Lomborg (2001). Les collisions contre les fenêtres et les chats tuent à peu près le même nombre d'oiseaux.

Un autre goulot d'étranglement qui contraint la mise en place d'éoliennes, ce sont les bateaux spécifiques qu'elles nécessitent. Pour pouvoir ériger 10 000 éoliennes (« 33 GW ») en 10 ans, il faudrait en gros 50 plates-formes auto-élévatrices, qui coûtent chacune autour de 60 millions de livres (72 millions d'euros), ce qui signifie un investissement de capital supplémentaire de 3 milliards de livres (3,6 milliards d'euros) serait nécessaire. Ce n'est pas un obstacle comparé au ticket à 33 milliards de livres (40 milliards d'euros) indiqué précédemment, mais le besoin de plates-formes auto-élévatrices est certainement un détail à ne pas négliger et qui requiert un minimum de planification à long terme.

Coût pour les oiseaux

Est-ce que ces moulins à vent tuent « un nombre considérable » d'oiseaux ? Les parcs éoliens ont récemment fait l'objet d'une contre-publicité en Norvège, où les éoliennes installées sur Smola, un chapelet d'îles au large de la côte nord-ouest, ont causé la mort de 9 aigles à queue blanche en 10 mois. Je partage la préoccupation du BirdLife International pour le bien-être des oiseaux rares. Mais je pense, comme toujours, qu'il est important d'en revenir aux chiffres. Certains estiment que 30 000 oiseaux sont tués chaque année par les éoliennes au Danemark, où elles produisent 19 % de l'électricité nationale. Quelle horreur ! Au ban les moulins à vent ! Par ailleurs, on apprend aussi que le *trafic automobile* tue *un million* d'oiseaux par an au Danemark. Trentuple horreur ! Trente fois plus au ban, les voitures ! Et en Grande-Bretagne, ce sont 55 millions d'oiseaux qui sont

tués chaque année par des *chats* (figure 10.6).

Si on en reste à l'émotionnel pur, moi, je voudrais vivre dans un pays pratiquement sans voiture ni éolienne, et tout plein de chats et d'oiseaux (et où les chats, qui prennent les oiseaux comme proies, seraient eux-mêmes la proie des aigles à queue blanche norvégiens, pour compenser). Mais ce que je voudrais par dessus tout, c'est que les décisions au sujet des voitures et des éoliennes soient prises de manière rationnelle et méticuleuse, et pas juste émotionnelle. Peut-être qu'on a besoin d'éoliennes !

Notes et bibliographie

Page n°

70 *Le parc éolien des Kentish Flats, situé dans l'estuaire de la Tamise ...*

Voir www.kentishflats.co.uk. Ses 30 éoliennes Vestas V90 ont une puissance totale en crête de 90 MW, et la production moyenne de puissance prévue était de 32 MW (en supposant un facteur de charge de 36 %). La vitesse moyenne du vent au niveau des pales est de 8,7 m/s. Les éoliennes sont implantées par 5 mètres de profondeur ; elles sont espacées de 700 mètres, et elles occupent une superficie de 10 km². La densité de puissance prévue pour ce parc éolien offshore était donc de 3,2 W/m². En fait, la production moyenne a été de 26 MW, ce qui signifie que le facteur de charge moyen en 2006 a été de 29 % [wbd80], et que la densité de puissance réelle a été de 2,6 W/m². La ferme éolienne de North Hoyle, au large de Prestatyn, au nord du Pays de Galles, a eu un facteur de charge plus élevé en 2006, de 36 %. Ses trente turbines de 2 MW, couvrant 8,4 km², avaient donc une densité de puissance moyenne de 2,6 W/m².

- *...les projets d'éoliennes en mer peu profonde sont économiquement faisables moyennant de modestes subsides, même si, en gros, ils coûtent deux fois plus cher que les projets terrestres.*

Source : Association danoise pour l'énergie éolienne windpower.org.

- *...à l'heure actuelle, les projets d'éoliennes en mer profonde ne sont économiquement pas rentables.*

Source : document d'information de la British Wind Energy Association, septembre 2005, www.bwea.com. Néanmoins, en 2007, un projet expérimental d'éolien en mer profonde, a implanté deux turbines à côté du champ de pétrole Beatrice, à 22 kilomètres au large de la côte est de l'Écosse (figure 10.8). Chacune de ces éoliennes a une « capacité » de 5 MW et est ancrée à 45 mètres de profondeur. Hauteur de l'axe des pales : 107 mètres ; diamètre : 126 mètres. Toute l'électricité produite sera utilisée par les plates-formes pétrolières. N'est-ce pas extraordinaire ! Le projet de 10 MW a coûté 30 millions de livres (36 millions d'euros) — ce ticket de 3 livres par watt en crête (3,6 €/W) est à comparer à celui des Kentish Flats, qui est de 1,2 livres par watt (1,4 €/W) (105 millions de livres (125 millions d'euros) pour 90 MW). www.beatricewind.co.uk

Il est possible que les éoliennes *flottantes* puissent modifier les paramètres économiques de l'éolien en mer profonde.

Zone	profondeur de 5 à 30 m		profondeur de 30 à 50 m	
	superficie (km ²)	ressource potentielle (kWh/j/p)	superficie (km ²)	ressource potentielle (kWh/j/p)
Nord-ouest	3 300	6	2 000	4
Greater Wash	7 400	14	950	2
Tamise (estuaire)	2 100	4	850	2
Autre	14 000	28	45 000	87
TOTAL	27 000	52	49 000	94

TABLEAU 10.7. Ressources éoliennes offshore potentielles proposées dans des régions stratégiques, si ces régions étaient *entièrement couvertes* d'éoliennes. Source : Department of Trade and Industry (2002b).

- 71 ... une estimation de la surface de mer qui pourrait, de manière plausible, être recouvertes d'éoliennes. Le document « Future Offshore » de 2002 du Ministère britannique du commerce et de l'industrie présente une analyse détaillée des surfaces utilisables pour l'énergie éolienne offshore. Le tableau 10.7 montre les estimations de ressources sur 76 000 km² en eau de mer profonde et peu profonde. L'estimation que fait le Ministère du commerce et de l'industrie de la puissance produite, si ces zones étaient *entièrement* couvertes d'éoliennes, est de 146 kWh/j par personne (qui se décomposent en 52 kWh/j/pers. pour la mer peu profonde et 94 kWh/j/pers. pour la mer profonde). Mais l'estimation que le Ministère du commerce fait du potentiel de production éolienne offshore n'est que de 4,6 kWh par jour et par personne. Il serait intéressant de décrire pourquoi il arrive à une estimation aussi basse en partant d'une évaluation aussi élevée, passant de 146 kWh/j par personne à 4,6 kWh/j par personne, et pourquoi ce dernier chiffre est beaucoup plus bas que le nôtre. Tout d'abord, le Ministère a imposé les contraintes suivantes : les éoliennes doivent se trouver à moins de 30 kilomètres du rivage, et sur moins de 40 mètres de profondeur d'eau ; le fond de la mer ne doit pas avoir une pente supérieure à 5° ; les voies de navigation, les zones militaires, les pipelines, les zones de pêche et les réserves naturelles sont exclus. Ensuite, il a supposé que seulement 5 % des sites potentiels seraient développés (du fait de la composition du sol marin ou des contraintes de planification) ; il a réduit de 50 % la capacité de tous les sites situés à moins de 15 kilomètres de la côte, pour des raisons d'acceptabilité du public ; de plus, il a réduit de 95 % la capacité des sites ayant une vitesse de vent supérieure à 9 m/s, pour prendre en compte les « obstacles au développement du fait d'un environnement hostile », et de 5 % la capacité des autres sites ayant une vitesse moyenne du vent comprise entre 8 et 9 m/s.
- 71 Si on prenait la totalité du littoral britannique (longueur : 3 000 kilomètres), et qu'on alignait des turbines le long de cette côte sur 4 kilomètres de large ... Les pédants de service vont dire que « la ligne côtière britannique n'a pas une longueur bien définie, parce que la côte est une fractale. » Oui, oui, c'est une fractale. Mais, cher pédant, veuillez prendre la peine de regarder une carte de Grande-Bretagne, et de tracer une bande de turbines de 4 kilomètres de large autour de l'île principale de Grande-Bretagne, et vous verrez que votre bande fait bien à peu près 3 000 kilomètres de long.

- *Horns Reef* (Horns Rev). Les difficultés rencontrées par cette ferme éolienne danoise de « 160 MW » au large du Jutland [www.hornsrev.dk] sont décrites par Halkema (2006). Lorsqu'elle fonctionne correctement, le facteur de charge de Horns Reef est de 43 %, et sa densité de puissance moyenne de 2,6 W/m².

73 *Liberty ships* —

www.liberty-ship.com/html/yards/introduction.html

- ...les installations pétrolières et gazières de mer du Nord contiennent 8 millions de tonnes d'acier et de béton — Rice et Owen (1999).
- Le gouvernement britannique a annoncé le 10 décembre 2007 qu'il autoriserait la création d'un parc éolien offshore d'une capacité de 33 GW ... [25e59w].
- ... « promesse en l'air ». Source : Guardian [2t2vjql].
- Combien ça coûterait, d'ériger ces « 33 GW » d'éolien offshore ? Selon le Ministère britannique du commerce et de l'industrie, en novembre 2002, l'électricité produite par les parcs éoliens en mer coûtait environ 60 € par MWh (0,05 livre sterling par kWh) (Department of Trade and Industry, 2002b, p21). Cependant, les éléments économiques évoluent avec le temps, et en avril 2007, le coût estimé de l'éolien offshore était de l'ordre de 110 € par MWh (0,092 livre sterling par kWh) (Department of Trade and Industry, 2007, p7). En avril 2008, le prix des éoliennes offshore était clairement encore plus élevé : Shell a renoncé à son engagement de participer à la construction de la Grille de Londres (*London Array*). C'est parce que l'éolien offshore est si cher que le gouvernement a dû augmenter le nombre de certificats d'engagement pour les renouvelables (ROC ou « *Renewable Obligation Certificate* ») par unité d'électricité éolienne offshore. Le ROC est une unité de subvention accordée à certaines formes de production d'électricité d'origine renouvelable. La valeur standard d'un ROC est de 45 livres (54 €), avec 1 ROC distribué par MWh. Ainsi, avec un prix de gros de l'ordre de 40 livres par MWh (48 €/MWh), les producteurs de renouvelables sont payés à hauteur de 85 livres par MWh (102 €/MWh). Une subvention de 1 ROC par MWh ne suffit donc pas à couvrir un coût de 92 livres par MWh (110 €/MWh). Dans le même document, les estimations pour les autres renouvelables (coût moyen en 2010) sont les suivantes : éolien terrestre : 65-89 livres par MWh (78-107 €/MWh); cogénération à partir de biomasse : 53 livres par MWh (64 €/MWh); grand hydroélectrique : 63 livres par MWh (76 €/MWh); gaz issu des déchets : 38 livres par MWh (46 €/MWh); photovoltaïque : 571 livres par MWh (685 €/MWh); énergie des vagues : 196 livres par MWh (235 €/MWh); marémoteur : 177 livres par MWh (212 €/MWh). Dale Vince, directeur général du fournisseur d'énergie verte Ecotricity, qui s'engage à construire des parcs éoliens terrestres, a indiqué qu'il soutenait les plans du gouvernement [de développement de l'éolien offshore], à condition que ce ne soit pas au détriment de l'éolien terrestre. « Il est dangereux de négliger la ressource fantastique que nous avons dans ce pays ... Selon nos estimations, construire les 33 GW d'éoliennes offshore proposés par Hutton coûterait quelque chose comme 40 milliards de livres sterling (48 milliards d'euros). On pourrait faire la même chose sur terre pour 20 milliards de livres (24 milliards d'euros). » [57984r]



FIGURE 10.8. Construction du parc expérimental d'éoliennes en mer profonde Beatrice. Photos aimablement fournies par Talisman Energy (UK) Limited.

- *Dans une zone urbaine typique en Angleterre, de telles micro-turbines ne fournissent que 0,2 kWh par jour.* Source : *Troisième rapport intérimaire*, www.warwickwindtrials.org.uk/2.html. Parmi les meilleurs résultats mentionnés par l'étude d'évaluation des micro-éoliennes faite par Warwick Wind Trials, on trouve une WS1000 Windsave (une machine de 1 kW) située à Daventry, montée à une hauteur de 15 m au-dessus du sol, et qui produit en moyenne 0,6 kWh/j. Mais certaines micro-éoliennes ne fournissent que 0,05 kWh par jour — source : Donnachadh McCarthy, « Mon année sans carbone », *The Independent*, décembre 2007 [6oc3ja]. L'éolienne Windsave WS1000, vendue en Angleterre dans les magasins B&Q, s'est vue décerner le prix de la « Connerie Écologique » par l'auteur de la *Housebuilder's Bible*, Mark Brinkley : « Allez, il est temps de reconnaître que l'industrie de l'éolien individuel sur les toits est un fiasco monumental. C'est jeter l'argent par les fenêtres pour une invention qui ne fonctionne pas. C'est le Sinclair C5 des années 2000. » [5soq12]. Le Met Office et le Carbon Trust ont publié un rapport en juillet 2008 [6g2jm5], qui estime que si des micro-turbines étaient installées sur toutes les maisons du Royaume-Uni où c'est économiquement intéressant, elles produiraient, au total, environ 0,7 kWh/j par personne. Ils concluent que dans les villes, les turbines montées sur les toits sont complètement inutiles : « il est possible que dans de nombreuses zones urbaines, les turbines installées sur les toits ne compensent même pas le carbone émis pour les fabriquer, les installer et les utiliser. »
- 74 *Une plate-forme auto-élevatrice coûte 60 millions de livres (72 millions d'euros).* Source : news.bbc.co.uk/1/hi/magazine/7206780.stm. J'ai estimé qu'il en faudrait environ une cinquantaine, en supposant qu'il y aurait une soixantaine de jours par an compatibles avec le travail en haute mer, et que le montage d'une turbine prendrait 3 jours.

Pour en savoir plus : Base de données du Royaume-Uni sur l'énergie éolienne : [\[www.bwea.com/ukwed/\]](http://www.bwea.com/ukwed/).



FIGURE 10.9. Kentish Flats. Photos © Elsam (elsam.com). Reproduit avec autorisation.

11 Gadgets

L'un des plus grands dangers pour la société, ce sont les chargeurs de téléphone. Le journal de la BBC n'a eu de cesse de nous sensibiliser sur ce point depuis 2005 :

« Les centrales nucléaires vont être arrêtées dans quelques années. Comment va-t-on garder les lumières de Grande-Bretagne allumées ? ... **Vous devez débrancher vos chargeurs de téléphones portables lorsque vous ne les utilisez pas.** »

Hélas, un an plus tard, la Grande-Bretagne n'avait pas compris le message, et la BBC a dû à nouveau nous alerter :

« **La Grande-Bretagne en tête du gaspillage d'énergie.** »

Mais comment ça se fait ? Et la BBC de répéter encore et encore le message dans tous les foyers :

« 65% des consommateurs britanniques laissent leurs chargeurs allumés. »

A entendre les journalistes parler de ces obscurs objets qui détruisent la planète, il est clair que ces machins sont à peu près aussi malfaisants que Dark Vador. Mais jusqu'à quel point, exactement ?

Dans ce chapitre, nous allons découvrir la vérité sur ces chargeurs. Nous allons également enquêter sur leurs cousins de la grande parade des gadgets : ordinateurs, téléphones, téléviseurs. Box et décodeurs numériques. Modems ADSL et câble. Dans ce chapitre, nous allons estimer la puissance nécessaire pour les utiliser et les charger, mais pas pour fabriquer ces joujoux — on s'en occupera dans un prochain chapitre intitulé « trucs ».

La vérité sur les chargeurs

Les chargeurs de téléphone modernes, lorsqu'on les laisse branchés sans téléphone, consomment environ un demi-watt. Dans nos unités préférées, cela fait une consommation de puissance d'environ **0,01 kWh par jour**. Pour tous ceux dont la consommation quotidienne dépasse les 100 kWh par jour, le conseil de la BBC de *toujours débrancher son chargeur de téléphone*, pourrait potentiellement réduire leur consommation d'énergie d'un centième de pourcent (s'ils le faisaient).

Chaque petit geste compte !

Je ne crois pas, non. Débrancher compulsivement son chargeur de téléphone, cela revient à écoper le Titanic avec une petite cuillère. Vous pouvez le débrancher, mais gardez bien à l'esprit qu'il s'agit d'un geste insignifiant. Permettez-moi de le dire autrement :

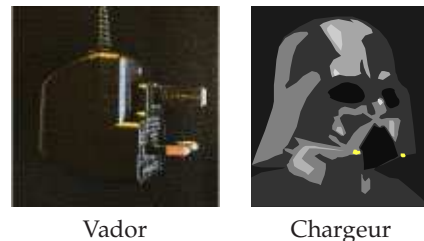


FIGURE 11.1. Destructeurs de la planète. Trouvez les sept différences.



FIGURE 11.2. Ces cinq chargeurs — trois pour les téléphones portables, un pour un ordinateur de poche, et un pour un ordinateur portable — se révèlent consommer moins d'un watt, indique mon wattmètre.

Toute l'énergie que vous économisez en débranchant votre chargeur pendant une journée, vous la bouffez en conduisant votre voiture pendant *une seconde*.

Toute l'énergie que vous économisez en débranchant votre chargeur pendant *une année entière*, vous la bouffez en vous faisant couler un seul bain chaud.

Certes, certains chargeurs plus anciens consomment plus d'un demi-watt — s'ils sont chauds quand on les touche, c'est qu'ils consomment sans doute un watt, ou peut-être même trois (figure 11.3). Et même un chargeur qui sifflerait ses 3 watts ne consommerait malgré tout que 0,07 kWh par jour. A mon avis, c'est une bonne idée de débrancher un tel chargeur — cela vous *fera* économiser 3 euros par an. Mais ne vous racontez pas d'histoires en croyant que ce faisant, vous « avez fait votre part de l'effort ». 3 W, c'est une fraction ridiculement petite de votre consommation totale d'énergie.

OK, maintenant, ça suffit d'écoper le Titanic avec une petite cuillère. Tâchons de découvrir où l'électricité est vraiment consommée.

Les gadgets vraiment gourmands

Le tableau 11.4 montre les consommations de puissance, en watts, d'une tripotée de gadgets pour la maison. La première colonne indique la consommation de puissance lorsque l'appareil est effectivement utilisé — par exemple, quand une chaîne Hi-Fi produit vraiment des sons. La deuxième colonne montre la consommation de puissance de ces appareils lorsqu'ils sont allumés sans rien faire. J'ai été abasourdi de découvrir qu'une imprimante laser branchée et inutilisée consommait 17 W — autant que la consommation moyenne d'un réfrigérateur-congélateur ! La troisième colonne montre la consommation de ces gadgets lorsqu'on leur demande explicitement de se mettre en veille. La quatrième colonne donne leur consommation lorsqu'on les éteint — mais qu'on les laisse toujours branchés au secteur. J'indique toutes ces consommations en watts — pour les convertir dans nos unités préférées, rappelez-vous que 40 W, c'est 1 kWh/j. Un bon aide-mémoire, au passage, c'est de se souvenir que chaque watt coûte à peu près un euro par an (en supposant que l'électricité coûte 0,11 ou 0,12 euro par kWh).

Les gadgets les plus électrophages sont l'ordinateur, son écran et la télévision, qui consomment des centaines de watts lorsqu'ils sont allumés. Les appareils électroniques de loisirs, comme les chaînes Hi-Fi et les lecteurs de DVD suivent de près l'ordinateur, la plupart d'entre eux consommant 10 W ou plus. Un lecteur de DVD ne vous coûte peut-être que 25 euros au magasin, mais si vous le laissez allumé en permanence, il vous coûte 10 euros de plus tous les ans. Certaines chaînes Hi-Fi et certains périphériques d'ordinateur consomment plusieurs watts même lorsqu'ils sont éteints, à



FIGURE 11.3. Ce téléphone sans fil si gourmand et son chargeur consomment 3 W lorsqu'on les laisse branchés. Cela fait 0,07 kWh/j. Si l'électricité coûte 11 centimes d'euro par kWh, alors cette petite fuite de 3 W va coûter 3 euros chaque année.

cause de leur transformateur secteur. Bref, pour être sûr qu'un gadget est vraiment éteint, il n'y a qu'une seule chose à faire : le débrancher de la prise murale.

La consommation cachée de l'ère de l'information

Selon Jonathan Koomey (2007), les centres qui regroupent les serveurs informatiques des États-Unis, et toute l'installation dont ils ont besoin (climatisation, systèmes d'alimentation de secours, etc.) consomment **0,4 kWh par jour et par personne** — soit un peu plus de 1 % de la consommation d'électricité des États-Unis. C'est le chiffre de la consommation pour 2005, qui, en passant, a doublé depuis l'an 2000, car le nombre de serveurs informatiques en fonctionnement a lui aussi doublé sur la période, passant de 5,6 à 10 millions.

Autres gadgets

Si vous l'utilisez quelques heures par semaine, un aspirateur consomme environ **0,2 kWh/j**. Tondre la pelouse du jardin, cela consomme environ **0,6 kWh**. On pourrait continuer ainsi la liste, mais je soupçonne que les ordinateurs et autres appareils de loisirs restent les plus gros suceurs de jus dans le bilan électrique de la plupart des gens.

Le chiffre qui résume ce chapitre : il va dépendre du nombre de gadgets que vous avez à la maison et au travail ; mais une bonne flopée de gadgets laissés allumés tout le temps peuvent facilement consommer **5 kWh/j**.

Légendes urbaines

« Ça ne sert à rien d'éteindre les lumières, les télévisions et les chargeurs de téléphone en hiver. L'énergie 'perdue' qu'ils laissent s'échapper chauffe ma maison, donc ce n'est pas du gaspillage. »

Ce mythe est *vrai* pour quelques personnes, et seulement durant l'hiver. Il est bien évidemment *faux* pour la plupart d'entre nous.

Si vous chauffez votre maison à l'électricité, avec des radiateurs ou des panneaux radiants ordinaires, alors oui, cela revient effectivement au même que de la chauffer avec n'importe quel appareil électrique, radiateur, chargeur ou lampes. Mais si c'est votre cas, vous devriez sérieusement penser à changer votre façon de vous chauffer. L'électricité est de l'énergie de haute qualité, et la chaleur de l'énergie de basse qualité. *C'est du gâchis de transformer de l'électricité en chaleur*. Pour être plus précis, si vous ne produisez qu'une seule unité de chaleur à partir d'une unité d'électricité, c'est du gâchis. Des appareils de chauffages appelés pompe à chaleur air-air, ou pompe à chaleur géothermique font bien mieux, en fournissant 3 ou 4 unités de chaleur pour chaque unité d'électricité consommée. Ces pompes à chaleur fonctionnent un peu comme des réfrigérateurs inversés, pompant la chaleur de l'air extérieur vers votre maison (voir le chapitre 21).

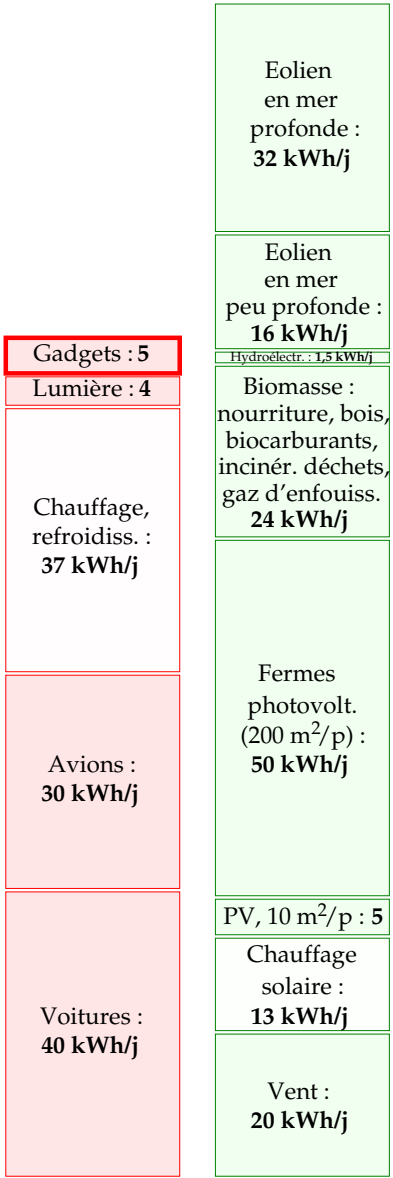


FIGURE 11.5. Systèmes informatiques et autres gadgets électroniques.

Gadget	Consommation de puissance (W)			
	Allumé	Allumé inutilisé	En veille	Éteint branché
Ordinateurs et périphériques :				
Unité centrale	80	55		2
Écran cathodique	110		3	0
Écran LCD	34		2	1
Projecteur	150		5	
Imprimante Laser	500	17		
Modem ADSL/Wi-Fi	9			
Ordinateur portable	16	9		0,5
Lecteur de CD portable	2			
Radio-Réveil	1,1	1		
Second radio-Réveil	1,9	1,4		
Radio numérique	9,1		3	
Lecteur de radiocassettes	3	1,2		1,2
Amplificateur stéréo	6			6
Second amplificateur stéréo	13			0
Système Home cinéma	7	7	4	
Lecteur de DVD	7	6		
Second lecteur de DVD	12	10	5	
Téléviseur (cathodique)	100		10	
Magnétoscope	13		1	
Décodeur TV	6		5	
Horloge de four micro-ondes	2			
XBox	160		2,4	
Sony PlayStation 3	190		2	
Nintendo Wii	18		2	
Répondeur téléphonique		2		
Second répondeur téléph.		3		
Téléphone fixe sans fil		1,7		
Chargeur de tél. portable	5	0,5		
Aspirateur	1 600			

TABLEAU 11.4. Consommation de puissance d'un certain nombre de gadgets, en watts. 40 W correspondent à 1 kWh/j.



Portable : 16 W Ordinateur : 80 W



LCD 31 W CRT 108 W Imprimante : 17 W (allumée, prête)



Projecteur : 150 W Radio numérique : 8 W

Pour les autres, dont les maisons sont chauffées avec des combustibles fossiles ou des biocombustibles, c'est une bonne idée d'éviter d'utiliser des gadgets électriques pour source de chaleur pour votre maison — du moins tant que notre demande sans cesse croissante en électricité est satisfaite en brûlant des combustibles fossiles. Il vaut mieux brûler ces combustibles fossiles à la maison. Le point important ici, c'est que si vous utilisez de l'électricité à partir d'une centrale thermique à flamme ordinaire, plus de la moitié de l'énergie des combustibles fossiles va malheureusement se perdre dans la cheminée de refroidissement de la centrale. De toute l'énergie qui est transformée en électricité, environ 8 % sont perdus dans le réseau de transport. Si vous brûlez les combustibles fossiles chez vous, il y a plus d'énergie qui sert directement à chauffer votre air.

Notes et bibliographie

Page n°

- 80 *Le journal de la BBC n'a eu de cesse de nous sensibiliser sur ce point ... Vous devez débrancher vos chargeurs de téléphone portable. .*

L'article de la BBC News de 2005, disait : « Les centrales nucléaires seront toutes arrêtées dans quelques années. Comment va-t-on garder les lumières de Grande-Bretagne allumées ? Voici trois moyens pour économiser de l'énergie : éteignez les magnétoscopes quand vous ne les utilisez pas, ne laissez pas vos téléviseurs en veille, et débranchez vos chargeurs de téléphone portable quand vous ne les utilisez pas. »

- 80 *Les chargeurs de téléphone modernes, lorsqu'on les laisse branchés sans téléphone, consomment environ un demi-watt.* Le wattmètre Maplin de la figure 11.2 n'est pas assez précis pour mesurer des puissances aussi faibles. Je remercie chaleureusement Sven Weier et Richard McMahon, du département d'ingénierie de l'université de Cambridge, pour avoir fait des mesures sur un chargeur standard Nokia avec un calorimètre précis. Ils ont trouvé que, connecté à aucun portable, le chargeur branché au secteur consommait 0,472 W pour rien. Ils ont fait d'autres mesures intéressantes : branché à un téléphone complètement chargé, le chargeur consomme 0,845 W, également en pure perte ; et lorsque le chargeur fait ce pour quoi il est fait, c'est-à-dire recharger la batterie partiellement chargée d'un portable Nokia, il consomme 4,146 W sous forme de chaleur. Certains pinailleurs vont demander : « Quelle est la puissance réactive du chargeur ? » Voilà ce qui s'appelle couper les cheveux en quatre avec des brouilles techniques, qui ne valent pas vraiment le coup d'y passer du temps. Pour la petite histoire, j'ai fait des mesures de la puissance réactive (avec un outil de mesure minable) et j'ai trouvé autour de 2 VA par chargeur. Vu que les pertes de puissance dans le réseau national se montent à 8 % de la puissance délivrée, à mon avis, la perte de puissance associée à la puissance réactive doit être d'au plus 0,16 W. Lorsqu'on l'utilise pour passer un appel, le portable consomme 1 W.

Pour en savoir plus : Kuehr (2003).

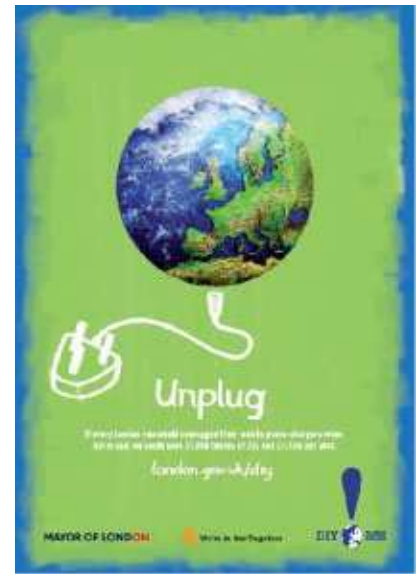


FIGURE 11.6. Publicité de la campagne « Do-It-Yourself planet repairs ». Le texte dit : « **Débranchez.** Si chaque foyer londonien débranchait ses chargeurs de téléphone portables inutilisés, on pourrait économiser 31 000 tonnes de CO₂ et 7,75 millions de livres sterling chaque année. » (9,7 millions d'euros) london.gov.uk/diy/



12 Vagues

Si l'énergie des vagues peut offrir de l'espoir à deux pays, c'est bien au Royaume-Uni et à l'Irlande — flanqués qu'ils sont de l'océan Atlantique d'un côté et de la mer du Nord de l'autre.

Tout d'abord, tirons au clair ce qui en est à l'origine : *le soleil provoque le vent, et le vent provoque la houle.*

L'essentiel de la lumière solaire qui frappe notre planète sert à réchauffer les océans. L'eau réchauffée chauffe à son tour l'air au dessus d'elle, et produit de la vapeur d'eau. L'air réchauffé s'élève ; au fur et à mesure qu'il s'élève, l'air se refroidit, et la vapeur d'eau qu'il transporte se condense, formant des nuages et de la pluie. Atteignant son altitude la plus élevée, l'air est encore plus refroidi par l'obscurité glaciale de l'espace. L'air froid plonge alors. Cette gigantesque pompe alimentée par l'énergie du soleil fait tourner l'air encore et encore dans d'énormes boucles de convection. De notre point de vue, à la surface, ces cellules de convection provoquent les vents. Le vent est une énergie solaire de seconde main. Au fur et à mesure qu'il pousse encore et encore l'eau de surface, il génère de la houle. La houle est donc de l'énergie solaire de troisième main. (Les vagues de houle qui s'écrasent sur la plage n'ont rien à voir avec les marées.)

Dans les grandes étendues d'eau, des vagues de houle apparaissent dès lors que la vitesse de vent dépasse 0,5 m/s environ. Les crêtes de ces vagues se déplacent à peu près à la vitesse du vent qui les a générées, et dans la même direction. La *longueur d'onde* de la houle (la distance entre deux crêtes qui se suivent) et sa *période* (le temps entre deux crêtes) dépendent de la vitesse du vent. Plus le vent souffle longtemps, et plus la surface sur laquelle souffle le vent est grande, plus la *hauteur* des vagues de houle que le vent génère est grande. Par conséquent, puisque les vents dominants au dessus de l'Atlantique vont d'ouest en est, les vagues de houle qui arrivent sur la côte Atlantique de l'Europe sont souvent assez grandes. (La houle qui arrive sur la côte est des îles britanniques est généralement bien moins forte, donc mes estimations du potentiel de puissance de la houle se concentreront sur la ressource se situant dans l'océan Atlantique.)

Les vagues de houle ont une grande mémoire, et elles conservent la même direction pendant des jours et des jours après que le vent qui les a créées a cessé de souffler, jusqu'à ce qu'elles rencontrent un obstacle. Dans les mers dans lesquelles les vents changent souvent de direction, les vagues de houle qui sont nées des jours différents se superposent et forment un fouillis, voyageant dans des directions différentes.

Si les vagues de houle qui voyagent dans une direction donnée rencontrent des objets qui absorbent leur énergie — par exemple, un chapelet d'îles avec des plages de sable — alors les mers au-delà de l'objet sont plus calmes. Les objets projettent une ombre, et il y a moins d'énergie dans les

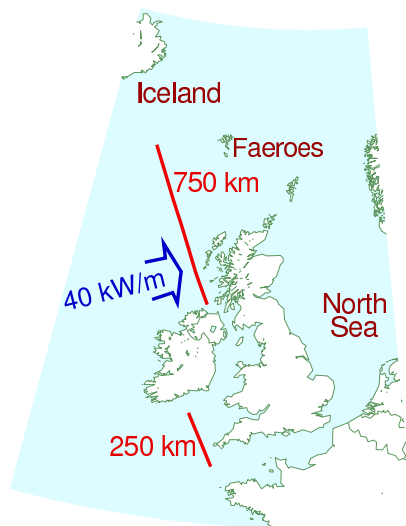


FIGURE 12.1. Un collecteur d'énergie de houle Pelamis est un serpent de mer constitué de quatre sections. Son nez fait face à la houle qui arrive. Les vagues de houle font ployer le serpent, et des générateurs hydrauliques résistent à ces mouvements. La puissance en crête d'un serpent est de 750 kW ; dans le site le plus favorable de l'Atlantique, un serpent fournirait en moyenne 300 kW. La photo est de *Pelamis wave power*. www.pelamiswave.com.

vagues de houle qui passent au travers. Donc, tandis que la lumière du soleil délivre une puissance par unité de *surface*, les ondes délivrent une puissance par unité de *longueur* de littoral. Vous ne pouvez pas avoir le beurre et l'argent du beurre. Vous ne pouvez pas recueillir l'énergie de la houle à la fois à trois kilomètres au-delà du rivage *et* à deux à l'intérieur des terres. Ou, plutôt, vous pouvez toujours essayer, mais l'installation à trois kilomètres du rivage absorbera l'énergie qui, sinon, aurait atteint l'installation dans les terres, et cette énergie ne sera pas remplacée par une autre. Pour que le vent crée une grosse houle, il lui faut des milliers de kilomètres de mer.

On peut trouver une limite supérieure à la puissance maximum théorique que l'on pourrait obtenir de la puissance de la houle, en faisant une estimation de la puissance entrante par unité de longueur de littoral exposé, et la multipliant par la longueur de ce littoral. Nous allons ignorer la question de savoir quel mécanisme technique pourrait collecter toute cette puissance, en commençant par trouver combien de puissance cela fait.

La puissance de la houle atlantique a été mesurée : elle est d'environ 40 kW par mètre de littoral exposé. On dirait bien que ça fait une puissance énorme ! Si chacun possédait un mètre de littoral et pouvait récolter l'intégralité de ses 40 kW, cela ferait plein de puissance pour couvrir notre consommation moderne. Malheureusement, *nous sommes trop nombreux*. Il n'y a pas assez de littoral atlantique pour que chacun d'entre nous ait son propre mètre.

Comme le montre la carte page 85, la Grande-Bretagne dispose d'environ 1 000 kilomètres de littoral atlantique (un million de mètres), ce qui fait $\frac{1}{60^e}$ de mètre par personne. Donc la puissance brute entrante est de 16 kWh par jour et par personne. Si on pouvait extraire toute cette puissance, l'Atlantique, au bord du rivage, serait plat comme une limande. En pratique, aucun système ne pourra réussir à absorber l'intégralité de cette puissance, et une partie de cette puissance sera inévitablement perdue durant la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique. Supposons que des machines à houle géniales aient un rendement de 50 % pour transformer la puissance entrante de la houle en électricité, et que nous soyons capables de remplir l'océan de machines à houle sur 500 kilomètres de littoral atlantique. Cela voudrait dire que l'on pourrait fournir 25 % de cette limite théorique. Cela fait **4 kWh par jour et par personne**. Comme d'habitude, je fais volontairement des hypothèses assez extrêmes pour pousser la pile verte vers le haut — j'espère bien que l'hypothèse qui consiste à *couvrir la moitié du littoral atlantique* d'absorbeurs de houle paraîtra délirante à la plupart des lecteurs.

A quoi ressemblent ces chiffres, comparés à ce que peut faire la technologie actuelle ? Au moment où j'écris ces lignes, il n'existe que trois machines à houle qui fonctionnent au large : trois collecteurs d'énergie de la houle Pelamis (figure 12.1) construits en Écosse et installés au Portugal. Aucun résultat de performance réel n'a encore été publié, mais les concep-

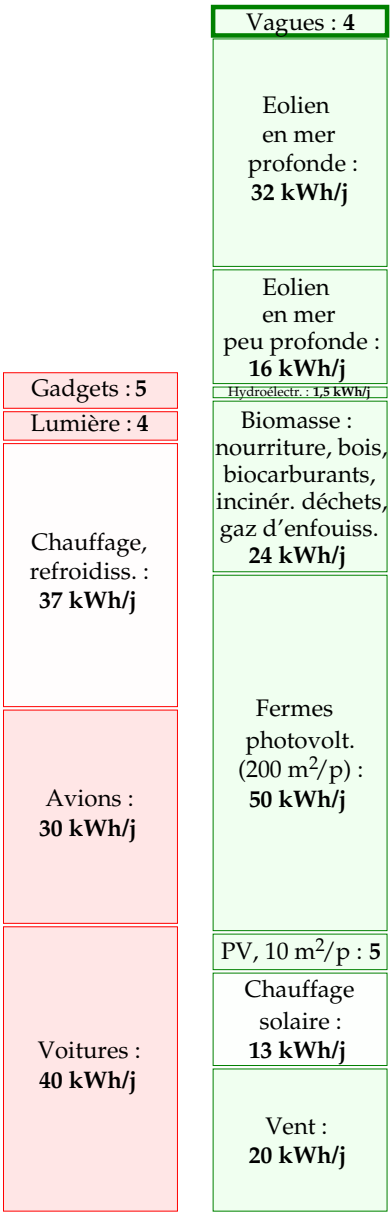


FIGURE 12.2. Les vagues de houle.

teurs du Pelamis (« conçu pour la survie comme objectif-clé avant même l'efficacité de l'absorption de l'énergie ») prévoient qu'un parc de machines à houle de deux kilomètres de long, constituée de 40 de leurs serpents de mer, pourrait fournir 6 kW par mètre de parc de machines à houle. Si on utilise ce chiffre dans le calcul précédent, la puissance délivrée par 500 kilomètres de parc de machines à houle descend à **1,2 kWh par jour et par personne**. Si l'énergie de la houle peut être utile à de petites communautés vivant sur des îles reculées, je subodore qu'elle ne pourra pas jouer un rôle déterminant dans la solution au problème d'énergie durable de la Grande-Bretagne.

Combien pèse un Pelamis, et de combien d'acier est-il fait ? Un serpent avec une puissance maximum de 750 kW pèse 700 tonnes, y compris les 350 tonnes de lest. Il contient donc 350 tonnes d'acier. Cela fait un rapport poids-puissance d'à peu près 500 kg par kW (crête). C'est à comparer aux besoins en acier de l'éolien en mer : une éolienne offshore avec une puissance maximum de 3 MW pèse 500 tonnes, y compris ses fondations. Ce qui fait un rapport poids-puissance d'à peu près 170 kg par kW, c'est-à-dire trois fois moins que la machine à houle. Le Pelamis est un premier prototype ; on peut supposer que de futurs investissements et développements dans la technologie de la houle feront baisser ce rapport poids-puissance.

Notes et bibliographie

Page n°

85 *Dans les grandes étendues d'eau, des vagues de houle sont générées dès lors que la vitesse de vent dépasse 0,5 m/s environ. Les crêtes de ces vagues se déplacent à peu près à la vitesse du vent qui les a générées, et dans la même direction.* La théorie la plus simple de production de la houle (Faber, 1995, p. 337) suggère que (pour une petite houle) les crêtes des vagues de houle se déplacent environ deux fois moins vite que le vent qui les a créées. Cependant, il a trouvé de manière empirique que plus le vent souffle longtemps, plus la longueur d'onde des vagues de houle qui sont présentes est grande, et plus leur vitesse est grande. La vitesse caractéristique dans les mers les plus creusées est presque exactement égale à la vitesse du vent 20 mètres au dessus de la surface de l'eau (Mollison, 1986).

– *La houle qui arrive sur la côte est des îles britanniques est généralement bien moins forte.* Alors que la puissance de la houle à Lewis (Atlantique) est de 42 kW/m, les puissances sur les sites de la côte est sont : Peterhead : 4 kW/m ; Scarborough : 8 kW/m ; Cromer : 5 kW/m. Source : Sinden (2005). Sinden indique que « la région de la mer du Nord souffre d'un environnement de houle de très faible énergie. »

86 *La puissance de la houle atlantique est d'environ 40 kW par mètre de littoral exposé.* (Le chapitre F explique comment on peut faire une estimation de cette puissance à partir de quelques données sur les vagues.) Ce chiffre repose sur des bases solides provenant de la littérature scientifique sur la puissance



Photo de Terry Cavner.

de la houle dans l'Atlantique (Mollison et al., 1976; Mollison, 1986, 1991). Dans Mollison (1986), par exemple, on lit : « la ressource à large échelle de l'Atlantique nord-est, qui va de l'Islande au nord du Portugal, possède une ressource nette de 40 à 50 MW/km, dont 20 à 30 MW/km est potentiellement récupérable de manière économiquement rentable. » En tout point du large dans cet océan, on peut distinguer trois puissances par unité de longueur : la puissance totale qui passe par ce point dans toutes les directions (63 kW/m en moyenne sur les îles de Scilly, et 67 kW/m au large de Uist); la puissance nette captée par un collecteur directionnel qui est orienté dans la direction optimale (respectivement 47 kW/m et 45 kW/m); et la puissance par unité de littoral, qui prend en compte le décalage d'alignement entre l'orientation optimale d'un collecteur directionnel et celle du littoral (par exemple, au Portugal, l'orientation optimale fait face au nord-ouest alors que le littoral fait face à l'est).

- 86 *En pratique, aucun système ne pourra réussir à absorber l'intégralité de cette puissance, et une partie de cette puissance sera inévitablement perdue durant la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique.* La première machine à houle de Grande-Bretagne connectée au réseau électrique, le LIMPET au large de l'île écossaise d'Islay, fournit un exemple frappant de l'importance de ces pertes. Lorsque le LIMPET a été conçu, son rendement de conversion de l'énergie de la houle en puissance électrique dans le réseau avait été évalué à 48 %, et la production de puissance prévue était de 200 kW. Mais dans les faits, les pertes dans le dispositif de captage de l'énergie, les volants d'inertie et les composants électroniques ont réduit la production moyenne à seulement 21 kW — ce qui fait un rendement de conversion de seulement 10 % de l'énergie de la houle arrivant sur le site (Wavegen, 2002).



13 Alimentation et agriculture

L'agriculture moderne, c'est l'art d'exploiter les terres pour transformer du pétrole en nourriture.

Albert Bartlett

Nous avons déjà vu dans le chapitre 6 combien de puissance renouvelable pouvait être *produite* avec de la verdure. Dans ce chapitre, nous allons voir combien de puissance peut être *consommée* pour nous donner notre pain quotidien.

Une personne modérément active, qui pèse 65 kg, consomme de la nourriture avec une teneur en énergie chimique d'environ 2 600 « Calories » par jour. Une « Calorie » (avec un grand 'C'), dans le cercle de l'industrie agroalimentaire, correspond en fait à 1 000 calories du chimiste (c'est-à-dire 1 kcal). 2 600 « Calories » par jour, cela fait environ 3 kWh par jour. L'essentiel de cette énergie finit par s'échapper du corps sous forme de chaleur ; autrement dit, une des fonctions d'une personne typique est d'agir comme un radiateur avec une production d'un peu plus de 100 W, soit une ampoule classique de moyenne puissance. Mettez 10 personnes dans une petite pièce froide, et vous pouvez éteindre le convecteur électrique de 1 kW.

Quelle quantité d'énergie consommons-nous réellement pour obtenir nos 3 kWh par jour ? Si on élargit notre point de vue pour prendre en compte les coûts inévitables de la production alimentaire en amont, alors on pourrait réaliser que notre empreinte énergétique est nettement plus importante. Cela dépend de notre régime alimentaire : végétalien, végétarien ou carnivore.

Le végétalien (qui ne mange ni viande, ni produit d'origine animale comme le lait ou les œufs) a la plus petite empreinte écologique inévitable : **3 kWh par jour** d'énergie provenant des plantes qu'il mange.

Boire du lait : le coût énergétique

J'adore le lait. Pour boire mon demi-litre de lait chaque jour, combien d'énergie cela exige-t-il ? Une vache laitière typique produit 16 litres de lait par jour. Mon demi-litre par jour m'impose donc d'utiliser $1/32^e$ d'une vache. Oh, mais attendez un instant — le fromage aussi, je l'adore ! Et pour faire 1 kg de camembert, il faut environ 9 kg de lait. Consommer 50 g de fromage par jour impose donc de produire 450 g de lait supplémentaires. OK : mon lait et mon fromage demandent donc $1/16^e$ d'une vache. Et combien d'énergie faut-il pour faire vivre une vache ? Disons que si une vache de 450 kg a des besoins énergétiques similaires par kilogramme qu'un humain (dont les 65 kg brûlent 3 kWh par jour), alors la vache doit consommer environ 21 kWh/j. Cette extrapolation de l'être humain à la vache vous laisse mal à l'aise ? Essayons de vérifier ces chiffres :



FIGURE 13.1. Une salade niçoise.

Minimum : 3 kWh/j



FIGURE 13.2. Énergie minimale requise pour une personne.

www.dairyaustralia.com.au dit qu'une vache allaitante qui pèse 450 kg a besoin de 85 MJ/j, ce qui fait 24 kWh/j. Nous n'étions pas tombés loin ! Donc, ma part d'¹/16^e de vache a une consommation d'énergie d'environ **1,5 kWh par jour**. Ce chiffre ne tient pas compte d'autres coûts énergétiques induits par le fait d'obliger la vache à produire du lait, de faire en sorte que le lait se transforme en fromage, et de faire voyager le lait et le fromage d'elle à vous. Nous parlerons de certains de ces coûts lorsque nous discuterons du fret et des supermarchés dans le chapitre 15.

Lait, fromage : **1,5 kWh/j**

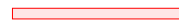


FIGURE 13.3. Lait et fromage.

Les œufs

Une poule pondeuse mange environ 110 g de nourriture pour poulets par jour. En supposant que l'alimentation des poulets a une teneur en énergie métabolisable de 3,3 kWh par kg, cela fait une consommation de puissance de 0,4 kWh par jour et par poulet. Le rendement des poules pondeuses est en moyenne de 290 œufs par an. Manger deux œufs par jour requiert donc une puissance de **1 kWh par jour**. Chaque œuf contient lui-même 80 kcal, soit environ 0,1 kWh. Donc d'un point de vue énergétique, la production d'œufs a un rendement de 20 %.

Œufs : **1 kWh/j**



FIGURE 13.4. Deux œufs par jour.

Manger de la viande : le coût énergétique

On va dire qu'un amateur enthousiaste de viande en mange environ 250 grammes par jour. (C'est à très peu de choses près la consommation moyenne de viande des Américains, qui est de 251 grammes par jour). Pour calculer la puissance nécessaire pour faire vivre les animaux de boucherie tout au long de leur vie, de la naissance à l'abattoir, il nous faut déterminer la durée pendant laquelle ces animaux vivent et consomment de l'énergie. Alors, qu'est-ce que vous désirez manger : du poulet, du porc, ou du bœuf ?

Du poulet, Monsieur ? Chaque poulet que vous mangez a caqueté pendant environ 50 jours. La consommation régulière de nos 250 grammes de poulet par jour requiert donc d'élever environ 12,5 kg de poulets en vie et de les préparer à être mangés. Et ces 12,5 kg de poulets consomment de l'énergie.

Vous préférez du porc, Madame ? Les porcs vivent plus longtemps — peut-être 400 jours de la naissance au saucisson — donc la consommation régulière de 250 grammes de porc par jour nécessite d'élever environ 100 kg de cochon vivant et de les préparer à être avalés.

De la vache, peut-être ? La production de bœuf est celle qui exige les durées d'élevage les plus longues. Il faut environ 1 000 jours de temps-vache pour créer un bifteck. La consommation régulière de 250 grammes de bœuf par jour requiert donc d'élever autour de 250 kg de bœuf vivant, préparés à être engloutis.

Régime carné :
8 kWh/j



FIGURE 13.5. Manger de la viande impose plus de puissance parce qu'il faut nourrir les bêtes qui font la queue en attendant d'être mangés.

Pour résumer toutes ces idées en un seul chiffre, on va supposer que vous mangez 250 grammes de viande par jour, répartis équitablement entre poulet, porc et bœuf. Cette habitude de consommer de la viande impose de nourrir en permanence 4 kg de viande de poulet, 33 kg de viande de porc, et 83 kg de viande de bœuf. Ce qui fait environ 120 kg de viande, ou près de 180 kg d'animal (puisque on arrive à transformer environ deux tiers de l'animal en viande). Et si ces 180 kg d'animal ont des besoins énergétiques comparables à ceux d'un humain (dont les 65 kg brûlent 3 kWh/j), alors la puissance nécessaire pour alimenter notre penchant pour la viande est de :

$$180 \text{ kg} \times \frac{3 \text{ kWh/j}}{65 \text{ kg}} \simeq 8 \text{ kWh/j.}$$

J'ai à nouveau pris la liberté physiologique de supposer que « les animaux sont comme les humains » ; une estimation plus précise de l'énergie nécessaire à la production de poulet se trouve dans les notes de fin de ce chapitre. Mais peu importe, je voulais juste une estimation à la louche, et la voici. La puissance requise pour produire la nourriture d'un consommateur typique de fruits et légumes, de produits laitiers, d'œufs et de viande est $1,5 + 1,5 + 1 + 8 = 12 \text{ kWh par jour}$. (La répartition calorifique quotidienne de ce régime un peu rude est de 1,5 kWh pour les fruits et légumes ; 0,7 kWh pour les produits laitiers ; 0,2 kWh pour les œufs ; et 0,5 kWh pour la viande — soit un total de 2,9 kWh par jour).

Ce chiffre ne prend pas en compte les coûts de puissance associés à l'agriculture, à l'usage d'engrais, aux traitements agro-alimentaires, à la réfrigération et au transport de la nourriture. Nous ferons une estimation de certains de ces coûts plus loin, et d'autres de ces coûts dans le chapitre 15.

Tous ces calculs vont-ils en faveur du végétarisme, en raison de sa moindre consommation d'énergie ? Cela dépend du lieu d'où provient la nourriture des animaux. Prenez les collines et les montagnes galloises, par exemple. A quoi d'autre qu'à brouter ces terres pourraient-elles bien servir ? Soit ces terres rocheuses sont utilisées pour y faire paître des moutons, soit elles restent inutilisées pour alimenter les humains. Vous pourriez imaginer ces pentes vertes naturelles être utilisées comme des plantations d'agrocarburants sans entretien, et les moutons comme des machines automatisées, auto-répliquantes, récoltant de futurs agrocarburants. Les pertes d'énergie entre la lumière du Soleil et le mouton sont substantielles, mais il n'y a probablement pas de meilleur moyen de capturer l'énergie solaire dans des endroits pareils. (Je ne suis pas sûr qu'avec cet argument en faveur de l'élevage du mouton au Pays de Galles, le compte soit bon : pendant la saison froide, les moutons gallois sont déplacés vers des champs plus bas où leur alimentation est complétée avec du tourteau de soja et d'autres aliments cultivés grâce à des engrais intensifs en énergie ; quel est le véritable coût en énergie ? Je ne sais pas). Des raisonnements sem-



FIGURE 13.6. Fera des moissons énergétiques pour obtenir de la nourriture.

blables peuvent être trouvés en faveur de l'alimentation carnée pour des lieux comme la brousse africaine ou les prairies australiennes ; et en faveur de la consommation de produits laitiers en Inde, où des millions de vaches sont nourries à partir de sous-produits de la culture du riz et du maïs.

D'un autre côté, lorsque les animaux sont élevés en cages et nourris avec des céréales que les humains auraient pu manger, il ne fait aucun doute qu'il serait plus économe en énergie de court-circuiter la chaîne alimentaire et de faire manger directement les céréales aux humains.

Les engrais et autres coûts énergétiques de l'agriculture

L'énergie grise des engrais en Europe est d'environ **2 kWh par jour et par personne**. Selon un rapport de l'université de Warwick à l'attention du DEFRA, l'agriculture au Royaume-Uni a utilisé en 2005 une énergie de **0,9 kWh par jour et par personne** pour les véhicules, les machines, le chauffage (en particulier les serres), l'éclairage, la ventilation et la réfrigération à usage agricole.

Minou, Médor et Jolly Jumper : le coût énergétique

Les animaux de compagnie ! Êtes-vous au service d'un chat, d'un chien ou d'un cheval ?

Il y a peut-être 8 millions de chats en Grande-Bretagne. Supposons que vous en ayez un. Le coût énergétique de votre chat préféré, ça fait combien ? S'il mange 50 g de viande par jour (poulet, porc et bœuf), alors les calculs du sous-chapitre précédent indique que la puissance nécessaire pour fabriquer sa nourriture n'est que de **2 kWh par jour**. Et s'il était végétarien, il aurait besoin d'encore moins.

De même, si votre chien Médor mange 200 g de viande par jour, et des féculents pour 1 kWh par jour, alors l'énergie nécessaire pour produire sa nourriture est environ **9 kWh par jour**.

Quant à notre ami Jolly Jumper, qui pèse autour de 400 kg, il consomme de l'ordre de **17 kWh par jour**.

Légendes urbaines

J'ai entendu dire que l'empreinte énergétique des aliments était si grande « qu'il valait mieux conduire que marcher. »

Vrai ou faux, cela dépend de votre régime alimentaire. Il est certainement possible de trouver des aliments dont l'empreinte énergétique sous forme de combustibles fossiles est supérieure à l'énergie fournie à un humain. Un sac de chips, par exemple, a demandé 1,4 kWh en combustibles fossiles par kWh d'énergie chimique avalée. L'énergie grise de la viande est encore plus élevée. Selon une étude de l'université d'Exeter, le régime alimentaire occidental typique a une empreinte énergétique d'environ 6 kWh

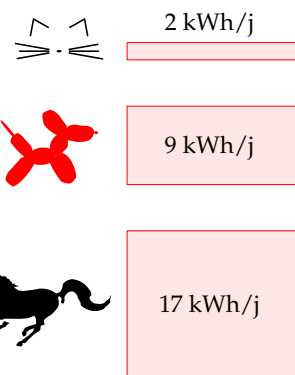


FIGURE 13.7. Puissance requise pour la nourriture de nos chers animaux de compagnie.

par kWh consommé. Pour savoir si c’est la conduite automobile ou la marche à pied qui consomme le moins d’énergie, il faut connaître le rendement de chaque mode de transport. Pour la voiture typique du chapitre 3, le coût en énergie était de 80 kWh pour 100 km. Marcher fait consommer une énergie nette de 3,6 kWh pour 100 km — 22 fois moins. Donc, si vous vivez toute votre vie en mangeant de la nourriture dont l’empreinte énergétique est supérieure à 22 kWh par kWh avalé, alors oui, le coût énergétique pour vous transporter d’un point A à un point B sera moindre en voiture que sur vos deux jambes. Mais si vous suivez un régime alimentaire classique (6 kWh par kWh), alors la phrase « il vaut mieux conduire que marcher » est un mythe. Marcher utilise quatre fois moins d’énergie que faire rouler la voiture.

Notes et bibliographie

Page n°

- 89 Une vache laitière typique produit 16 litres de lait par jour. Il y a 2,3 millions de vaches laitières au Royaume-Uni, chacune produisant environ 5 900 litres par an. La moitié de tout ce lait produit par les vaches est vendue sous forme de lait liquide. www.ukagriculture.com, www.vegsoc.org/info/cattle.html
- 90 Le poulet. Une poule pondeuse adulte (âgée de 20 semaines) pèse entre 1,5 et 1,6 kg. Ses aliments ont un contenu énergétique de 2 850 kcal/kg, ce qui fait 3,3 kWh/kg. Sa consommation de nourriture grimpe jusqu’à atteindre 340 g par semaine à l’âge de 6 semaines, puis 500 g par semaine à l’âge de 20 semaines. Une fois qu’elle pond, son régime alimentaire typique est de 110 g par jour.
L’aliment des poulets de chair a un contenu énergétique de 3,7 kWh par kg. La consommation énergétique est comprise entre 400 et 450 kcal par jour et par poule (0,5 kWh/j par poule), pour un poids typique de 2 kg. Un poulet de chair pesant 2,95 kg consomme au total 5,32 kg d’aliments [5h69fm]. L’énergie grise de la viande de poulet est donc d’environ 6,7 kWh par kg d’animal, ou 10 kWh par kg de viande consommée. Si j’avais utilisé ce chiffre à la place de mon estimation grossière, la contribution énergétique de la viande de poulet aurait grimpé un peu. Mais dans la mesure où l’empreinte énergétique du régime alimentaire carné est dominée par le bœuf, ça ne change pas grand-chose d’avoir sous-estimé la contribution du poulet. Sources : Subcommittee on Poultry Nutrition, National Research Council (1994), www.nap.edu/openbook.php?isbn=0309048923, MacDonald (2008), et www.statistics.gov.uk/statbase/datasets2.asp.
- Il faut environ 1 000 jours de temps-vache pour créer un bifteck. 33 mois de la conception à l’abattage : 9 mois de gestation et 24 mois d’élevage. www.shabdenparkfarm.com/farming/cattle.htm
- 91 On va supposer que vous mangez 200 grammes de viande par jour, répartis équitablement entre poulet, porc et bœuf. Ce chiffre est proche de la consommation

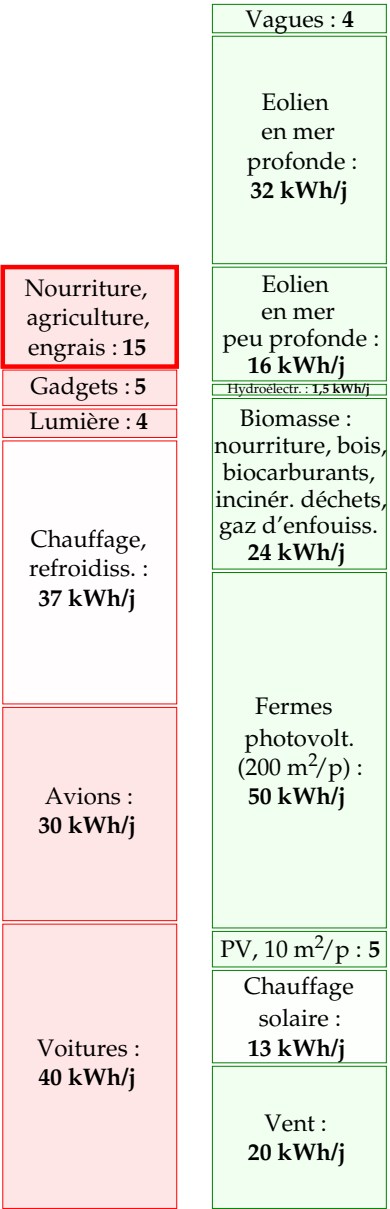


FIGURE 13.8. Alimentation et agriculture.

moyenne de viande aux États-Unis, qui est de 251 grammes par jour — comprenant 108 grammes de poulet, 81 grammes de bœuf, et 62 grammes de porc (MacDonald, 2008).

- 92 *L'énergie contenue dans les engrais en Europe est d'environ 2 kWh par jour par personne.* En 1998–1999, l'Europe occidentale utilisait 17,6 Mt par an d'engrais : 10 Mt de nitrates, 2,5 Mt de phosphate et 4,1 Mt de potasse. Ces engrais ont des empreintes énergétiques de 21,7 kWh, 4,9 kWh, et 3,8 kWh par kg respectivement. En répartissant cette énergie entre 375 millions de personnes, nous trouvons une empreinte totale de 1,8 kWh par jour par personne. Sources : Gellings et Parmenter (2004), International Fertilizer Industry Association [5pwojp].
- *L'agriculture au Royaume-Uni a utilisé en 2005 une énergie de 0,9 kWh par jour et par personne.* Source : Warwick HRI (2007).
 - *Un paquet de chips a demandé 1,4 kWh en combustibles fossiles par kWh d'énergie chimique avalée.* J'ai estimé cette énergie à partir de l'empreinte carbone d'un paquet de chips : 75 g de CO₂ pour un sac standard de 35 g [5bj8k3]. Sur cette empreinte, 44 % sont associés à la culture, 30 % à la transformation, 15 % à l'emballage, et 11 % au transport et à l'élimination des déchets. L'énergie chimique fournie au consommateur est de 770 kJ. Donc cet aliment a une empreinte carbone de 350 g par kWh. En supposant que la plupart de cette empreinte carbone provient de combustibles fossiles à 250 g de CO₂ par kWh, l'empreinte énergétique des chips est de 1,4 kWh de carburants fossiles par kWh d'énergie chimique avalée.
- 93 *Le régime alimentaire typique a une empreinte énergétique d'environ 6 kWh par kWh consommé.* Coley (2001) estime que l'énergie grise d'un régime typique est de 5,75 fois l'énergie fournie. La marche à pied a une empreinte carbone de 42 g/km ; le vélo, 30 g/km. A titre de comparaison, rouler avec une voiture moyenne émet 183 g/km.
- *Marcher fait consommer une énergie nette de 3,6 kWh pour 100 km.* Un humain en train de marcher consomme au total 6,6 kWh pour 100 km [3s576h] ; nous en retirons l'énergie consommée au repos pour obtenir l'empreinte énergétique de la marche à pied (Coley, 2001).

Pour en savoir plus : Weber et Matthews (2008).

14 Marées

La Terre et la Lune se déplacent en formant un ballet annuel qui tourbillonne et pirouette autour du Soleil. Ensemble, elles font un tour autour du Soleil une fois par an, alors que, dans le même temps, elles virevoltent l'une autour de l'autre faisant un tour tous les 28 jours. La Lune tourne aussi sur elle-même tous les 28 jours, de sorte qu'elle montre toujours la même face à sa partenaire, la Terre. En bonne prima donna, la Terre ne retourne pas le compliment : elle fait sa pirouette une fois par jour. Cette danse unie est perpétuée par la force de la gravité : chaque morceau de Terre, de Lune et de Soleil est attiré vers chaque autre morceau de Terre, de Lune et de Soleil. La somme de toutes ces forces est *presque* exactement ce qui est nécessaire pour perpétuer ce ballet. Mais il existe des déséquilibres très faibles entre les forces gravitationnelles et les forces nécessaires pour perpétuer cette danse. Ce sont ces déséquilibres qui donnent naissance aux marées.

Les déséquilibres qui correspondent au tourbillon de la Lune et de la Terre l'une autour de l'autre sont à peu près trois fois plus importants que les déséquilibres liés à la danse plus lente de la Terre autour du Soleil. Par conséquent, l'amplitude des marées varie avec les phases de la Lune, selon que la Lune et le Soleil sont ou non alignés avec la Terre. Lors de la Pleine Lune et de la Nouvelle Lune (lorsque la Lune, la Terre et le Soleil sont alignés), les déséquilibres se renforcent mutuellement, et les grandes marées qui en résultent sont appelées *marées de vives-eaux*. (On les appelle aussi parfois « marées d'équinoxe » : à tort, car elles n'arrivent *pas* au moment de l'équinoxe, mais toutes les deux semaines, aussi régulières qu'une horloge.) A chaque Quartier (le Premier et le Dernier), les déséquilibres se compensent partiellement, et les marées sont plus petites : ce sont des *marées de mortes-eaux*. Les marées de vives-eaux ont une amplitude environ double des marées de mortes-eaux : l'eau monte deux fois plus haut au dessus de l'altitude moyenne de la surface des mers lors des marées de vives-eaux que lors des marées de mortes-eaux, et les courants de marée y sont également deux fois plus forts.

Pourquoi y a-t-il deux marées hautes et deux marées basses par jour ? Eh bien, si la Terre était une sphère parfaite, une boule de billard lisse recouverte par les océans, l'effet de marée provoqué par le ballet tourbillonnant de la Terre et de la Lune serait de déformer légèrement l'eau dans la direction de la Lune et la direction opposée à la Lune, lui faisant prendre une forme qui ressemble un peu à un ballon de rugby (figure 14.1). Une personne qui vivrait à l'équateur de cette Terre lisse comme une boule de billard, qui fait un tour complet sur elle-même en un jour à l'intérieur de ce cocon aquatique, verrait le niveau de l'eau monter et descendre deux fois par jour : vers le haut une première fois lorsqu'il passe sous le nez du ballon de rugby, et une seconde fois lorsqu'il passe sous sa queue. Cette

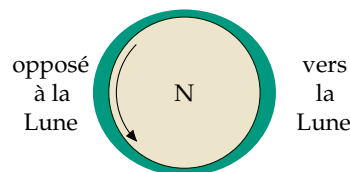


FIGURE 14.1. Un océan couvrant une Terre lisse comme une boule de billard. Le pôle nord est au centre de la figure, et la Lune se trouve à 60 centimètres au-delà de la page, vers la droite. La Terre tourne sur elle-même, faisant un tour complet en un jour, à l'intérieur d'une coquille d'eau en forme de ballon de rugby. Les océans sont étirés vers et à l'opposé de la Lune parce que les forces gravitationnelles provoquées par la Lune ne sont pas exactement égales à la force centripète qu'il faudrait exercer pour maintenir la Lune et la Terre tournant autour de leur centre de gravité commun. Une personne qui se tiendrait à l'équateur (tournant autour du centre de la Terre comme l'indique la flèche) vivrait deux marées hautes et deux marées basses par jour.

explication de bande dessinée ne reflète pas totalement la réalité. Dans les faits, la Terre n'est pas lisse, et elle n'est pas uniformément recouverte par l'eau (vous l'avez peut-être remarqué). Deux mamelons d'eau ne peuvent pas glisser en faisant le tour de la Terre une fois par jour parce qu'il y a des continents sur le passage. Le véritable comportement des marées est donc bien plus complexe. Dans une grande masse d'eau comme l'océan Atlantique, des bosses et des creux de la marée se forment mais, incapables de glisser tout autour de la Terre, ils font ce qu'ils peuvent, voyageant le long du périmètre de l'océan. Dans l'Atlantique Nord, il y a deux bosses et deux creux qui font le tour de l'Atlantique une fois par jour dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. Ici, en Grande-Bretagne, on ne peut pas voir directement ces bosses et ces creux de l'Atlantique — nous sommes en retrait de quelques centaines de kilomètres de la masse principale d'eau océanique, séparés d'elle par une pataugeoire appelée plateau continental. A chaque fois qu'une des bosses de la masse principale atlantique passe devant nous, elle nous envoie une bosse sur notre pataugeoire. De même, chaque creux de l'Atlantique nous envoie un creux sur notre pataugeoire. Les bosses et les creux se suivent avec six heures d'écart. Ou, pour être plus précis, avec six heures et quinze minutes, puisque le délai entre deux levers de Lune est de 25 et non 24 heures.

La vitesse avec laquelle les bosses et les creux voyagent varie avec la profondeur de notre pataugeoire. Moins la pataugeoire est profonde, moins les bosses et les creux sont rapides, et plus ils sont grands. En haute mer, les marées ne font que 30 à 50 cm de hauteur. A son arrivée dans les estuaires européens, le marnage (la hauteur entre le niveau de l'eau à marée haute et celui à marée basse) peut aller jusqu'à quatre mètres. Dans l'hémisphère nord, à cause de la force de Coriolis (une force qui correspond à la rotation de la Terre et qui ne s'applique qu'aux objets en mouvement), toutes les bosses et tous les creux de marée ont tendance à serrer le rivage est de la masse d'eau lorsqu'ils se déplacent. Par exemple, les marées de la Manche sont plus importantes du côté français. De même, les bosses et les creux de la mer du Nord près des îles Orcades, au large de la pointe nord-est de l'Écosse, serrent la côte britannique, vont vers l'estuaire de la Tamise, puis tournent ensuite à gauche au niveau des Pays-Bas pour rendre un dernier hommage au Danemark.

L'énergie marémotrice est parfois appelée énergie lunaire, puisque c'est principalement grâce à la Lune que l'eau se balance ainsi. Cependant, l'essentiel de l'énergie marémotrice provient réellement de l'énergie de rotation de la Terre tournant sur elle-même. Et peu à peu, la Terre ralentit.

Donc, comment peut-on rendre utilisable l'énergie des marées, et quelle quantité pourrait-on en tirer ?

Premières estimations de la puissance des marées

Quand on pense à l'exploitation de la puissance des marées, on pourrait



FIGURE 14.2. Bassin marémoteur et usine marémotrice de Woodbridge. Photos gracieusement fournis par Ted Evans.

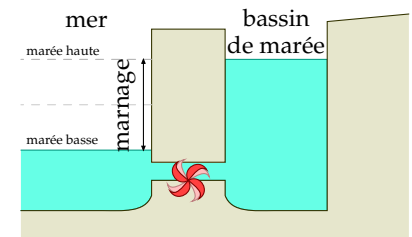
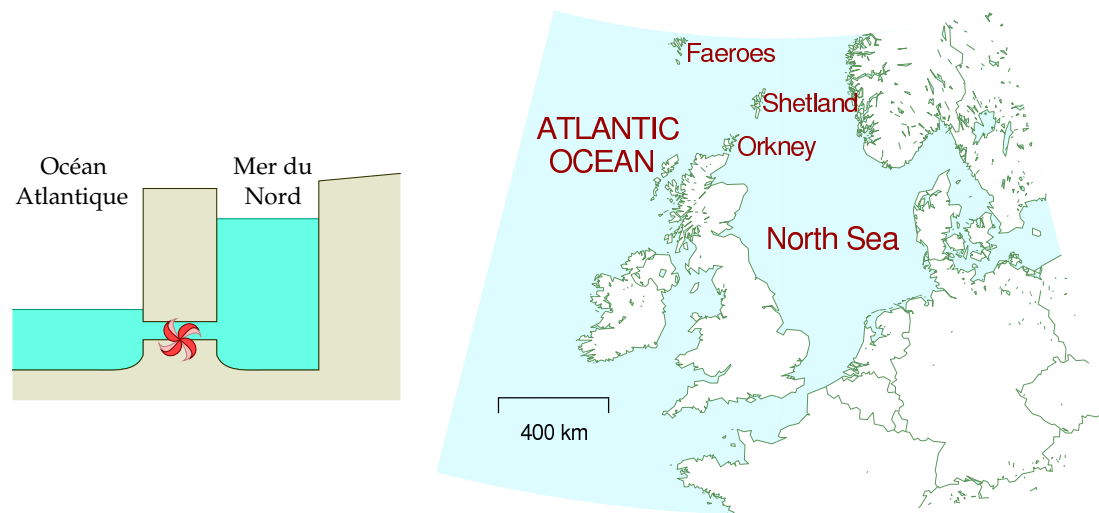


FIGURE 14.3. Un bassin marémoteur artificiel. Le bassin a été rempli à marée haute, et maintenant, c'est la marée basse. On laisse l'eau sortir en passant par le générateur électrique pour transformer l'énergie potentielle de l'eau en électricité.



imaginer un bassin artificiel à côté de la mer, avec une roue à eau qui tourne lorsque le bassin se remplit ou se vide (figures 14.2 et 14.3). Le chapitre G montre comment estimer l'énergie disponible à partir de tels bassins marémoteurs. En supposant que le marnage est de 4 mètres — une hauteur typique dans de nombreux estuaires européens — la puissance maximum d'un bassin marémoteur artificiel qui se remplit rapidement à marée haute et se vide tout aussi rapidement à marée basse, générant ainsi de la puissance à partir des deux directions du courant d'eau, est d'environ 3 W/m^2 . C'est la même puissance par unité de surface que celle obtenue à partir d'un parc éolien offshore. Et nous savons déjà quelle taille les parcs éoliens offshore doivent avoir pour compter vraiment. *Ils doivent avoir la taille d'un pays entier.* Donc de la même manière, pour faire des bassins marémoteurs qui soient capables de produire une énergie comparable à ce que consomme la Grande-Bretagne, il nous faut une surface totale de bassins marémoteurs du même ordre que la surface de la Grande-Bretagne.

Étonnamment, la Grande-Bretagne est déjà dotée d'un bassin marémoteur naturel aux dimensions requises : la mer du Nord (figure 14.4). Si on installait simplement des générateurs dans les lieux appropriés, de la puissance pourrait être extraite dans des quantités significatives. Les générateurs pourraient ressembler à des éoliennes sous-marines. Et parce que la densité de l'eau est 1 000 fois celle de l'air, la puissance du courant d'eau est 1 000 fois plus grande que la puissance du vent à la même vitesse. Nous reviendrons plus loin sur les fermes marémotrices, mais avant cela, nous allons voir la quantité brute d'énergie de marée qui circule chaque jour autour de la Grande-Bretagne.

FIGURE 14.4. Les îles Britanniques ont une situation privilégiée : la mer du Nord forme un bassin marémoteur naturel dans lequel de grandes quantités d'eau entrent et sortent deux fois par jour.

marnage	densité de puissance
2 m	1 W/m^2
4 m	3 W/m^2
6 m	7 W/m^2
8 m	13 W/m^2

TABLEAU 14.5. Densité de puissance (puissance par unité de surface) des bassins marémoteurs, en supposant que le générateur exploite à la fois la marée montante et descendante.

La puissance brute des marées

Les marées autour de la Grande-Bretagne sont de véritables ondes de marée — contrairement aux tsunamis, que l'on appelle aussi « raz-de-marée », mais qui n'ont absolument rien à voir avec les marées. Suivons une marée haute lorsqu'elle arrive de l'Atlantique. L'heure de la marée haute se décale progressivement dans le temps au fur et à mesure que l'on va vers l'est dans la Manche, de la côte bretonne au Cotentin, puis au Pas-de-Calais. La crête de la vague de marée progresse le long de la Manche à environ 70 km/h. (La bosse de la vague se déplace beaucoup plus vite que l'eau elle-même, tout comme les vagues ordinaires sur la mer qui se déplacent plus rapidement que l'eau dont sont faites ces vagues.) De même, une marée haute se déplace dans le sens des aiguilles d'une montre autour de l'Écosse, longeant la côte est de la Grande-Bretagne du nord au sud à une vitesse d'environ 100 km/h. Ces deux marées hautes convergent dans l'estuaire de la Tamise. Par coïncidence, la crête écossaise arrive 12 heures après la crête venant de Cornouailles, arrivant en quasi-synchronie avec la marée haute suivante qui vient de Cornouailles, et Londres reçoit ses deux marées hautes classiques par jour.

La puissance que l'on peut extraire des marées ne peut dépasser la puissance totale de ces ondes de marée venant de l'Atlantique. La puissance totale qui croise les lignes de la figure 14.6 a été mesurée : en moyenne, elle s'élève à 100 kWh par jour et par personne. Si on imagine n'extraire que 10 % de cette énergie incidente et si les processus de conversion et de transmission ont un rendement de 50 %, la puissance moyenne fournie serait de 5 kWh par jour par personne.

C'est une première estimation grossière, faite sans avoir défini le moindre détail technique. Nous allons maintenant estimer la puissance qui peut être fournie par les trois solutions techniques suivantes : les fermes exploitant le courant de marées (ou fermes marémotrices), les barrages marémoteurs et les lagons de marée en mer.

Fermes marémotrices

Une des manières de récupérer l'énergie des courants de marée est de construire des fermes hydroliennes, tout comme les parcs d'éoliennes. La première turbine de ce genre, ou génératrice de « courant de marée », à être reliée au réseau électrique a été une turbine de « 300 kW », installée en 2003 près de la ville septentrionale de Hammerfest, en Norvège. Aucun résultat détaillé de la production de puissance n'a encore été publié et à ce jour, il n'existe pas encore de ferme marémotrice avec plus d'une turbine. Il va donc falloir nous reposer sur la physique et un zeste d'intuition pour prévoir combien de puissance ces fermes vont pouvoir produire. En supposant que les règles pour choisir un bon site sont à peu près les mêmes pour le vent et pour les marées, et que le rendement des turbines marémo-

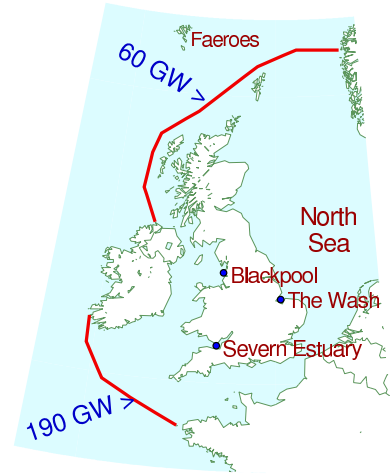


FIGURE 14.6. La puissance entrante moyenne des ondes de marée lunaire croisant ces deux lignes a été mesurée à 250 GW. Cette énergie brute, partagée entre 60 millions de personnes, est de 100 kWh par jour et par personne.

vitesse		densité de puissance (W/m ²)
(m/s)	(nœuds)	
0,5	1	1
1	2	8
2	4	60
3	6	200
4	8	500
5	10	1 000

TABEAU 14.7. Densité de puissance d'une ferme marémotrice (en watts par mètre carré de sol marin) par rapport à la vitesse du courant. (1 nœud = un mille nautique par heure = 0,514 m/s).

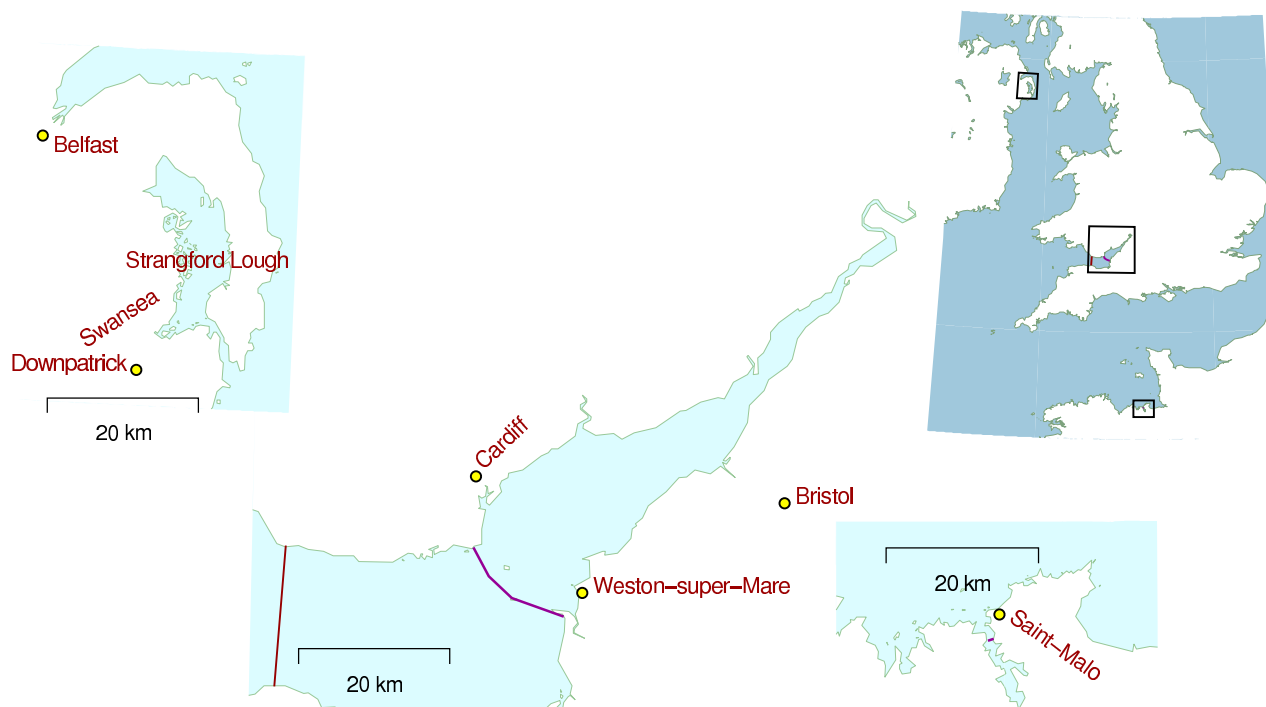


FIGURE 14.8. Les propositions de barrage sur les fleuves Severn, au sud du Pays de Galles (en bas à gauche), et Strangford Lough, en mer d'Irlande (en haut à gauche), montrées à la même échelle que le barrage de la Rance, en Bretagne.

La carte donne deux propositions de barrage sur la Severn. Un barrage à Weston-super-Mare fournirait une puissance moyenne de 2 GW (soit 0,8 kWh/j par personne). La proposition alternative en aval fournirait deux fois plus.

Strangford Lough en Irlande du Nord dispose aussi d'un grand potentiel marémoteur. La surface de Strangford Lough est de 150 km² ; le marnage y est de 4,5 m en vives-eaux et de 1,5 m en mortes-eaux — hélas, bien moins que celui de la Rance ou de la Severn. La puissance brute du bassin marémoteur naturel à Strangford Lough est d'environ 150 MW qui, partagés entre les 1,7 millions d'habitants d'Irlande du nord atteint 2 kWh/j par personne. Strangford Lough a été le site choisi pour installer la première génératrice de courant de marée connectée au réseau électrique du Royaume-Uni.

trices est comparable à celui des meilleures turbines éoliennes, le tableau 14.7 montre la puissance d'une ferme marémotrice pour quelques vitesses de courant de marée.

Étant donné que des courants de marée de 2 à 3 nœuds sont chose fréquente, il y a de nombreux endroits autour des îles Britanniques où la puissance par unité de surface d'une ferme marémotrice serait de 6 W/m² ou plus. Cette densité de puissance peut être comparée à nos estimations concernant les parcs éoliens (2 à 3 W/m²) et photovoltaïques (5 à 10 W/m²).

Une puissance des marées pareille, ce serait bête de cracher dessus ! Quelle pourrait être sa contribution, en supposant qu'il n'y ait pas d'obstacles économiques à l'exploitation de l'énergie marémotrice sur tous les points chauds autour du Royaume-Uni ? Le chapitre G énumère les vitesses des courants des meilleurs sites britanniques, et estime que 9 kWh/j par personne pourrait en être extraits.

Barrages

Les barrages marémoteurs sont une technologie éprouvée. Le célèbre barrage de la Rance, en Bretagne, où le marnage atteint en moyenne la hauteur record de 8 mètres, produit une puissance moyenne de 60 MW depuis 1966. Le marnage dans l'estuaire de la Severn, à la frontière entre Angleterre et Pays de Galles, est lui aussi exceptionnellement élevé. À Car-

diff, le marnage peut atteindre 11,3 mètres en période de vives-eaux, et 5,8 mètres en période de mortes-eaux. Si un barrage était installé en travers de l'embouchure de la Severn (de Weston-super-Mare à Cardiff), il créerait un bassin marémoteur de 500 km² (figure 14.8). Notez à quel point ce bassin serait beaucoup plus grand, comparé à celui de l'estuaire de la Rance. Quelle puissance ce bassin marémoteur pourrait-il offrir, si on laissait l'eau entrer et sortir au bon moment, générant ainsi de la puissance à la fois à marée montante et descendante ? Selon les chiffres théoriques du tableau 14.5, avec un marnage de 11,3 m, la puissance moyenne produite par le barrage (à 30 W/m²) ne dépasserait pas 14,5 GW, soit **5,8 kWh/j par personne**. Avec un marnage de 5,8 m, la puissance moyenne apportée par le barrage (à 8 W/m²) serait de 3,9 GW au maximum, soit **1,6 kWh/j par personne**. Ces chiffres sont basés sur l'hypothèse qu'on laisse l'eau entrer dans le bassin en une seule vague au moment où la marée est la plus haute, et qu'on la laisse sortir en une seule vague lorsqu'elle est au plus bas. Dans la pratique, l'entrée et la sortie de l'eau seraient étalées sur quelques heures, ce qui réduirait un peu la puissance produite.

Les propositions de barrage actuelles ne produiraient de la puissance que dans une seule direction. Cela réduit encore l'énergie produite de 50 %. Les rapports des ingénieurs portant sur le projet de barrage de la Severn indiquent qu'en ne générant de la puissance qu'en marée descendante, cela fournirait en moyenne **0,8 kWh/j par personne**. Le barrage offrirait également une protection contre les inondations, évaluée à environ 120 millions de livres sterling par an (150 millions d'euros).

Lagons marémoteurs

On fabrique des lagons marémoteurs en construisant des murs dans la mer ; les lagons ainsi créés peuvent ensuite être utilisés comme des estuaires artificiels. Cependant, il y a quelques conditions pour pouvoir fabriquer ces lagons : l'eau doit y être peu profonde, et le marnage important. On peut faire des économies d'échelle : l'électricité produite par les lagons marémoteurs est d'autant moins chère que les lagons sont grands. Les deux principaux sites de Grande-Bretagne où l'on pourrait construire de grand lagons marémoteurs sont la Wash sur la côte est et les eaux au large de Blackpool sur la côte ouest (figure 14.9). Des installations plus petites pourraient également être construites dans le nord et le sud-ouest du Pays de Galles, dans le Lincolnshire et dans l'est du Sussex.

Si deux lagons sont construits sur le même site, il y a une astuce que l'on peut utiliser pour augmenter la puissance obtenue et faire que le lagon puisse fournir de la puissance à la demande et à n'importe quel moment, quel que soit l'état de la marée. L'un des lagons peut être défini comme le « lagon supérieur », et l'autre comme le « lagon inférieur ». A marée basse, de la puissance fournie en vidant le lagon supérieur peut être consommée pour *vider aussi* le lagon inférieur par pompage, et faire que son niveau

d'eau soit encore plus bas que la marée basse. L'énergie nécessaire pour vider le lagon inférieur est ensuite remboursée avec intérêts à marée haute, lorsque de la puissance est produite en laissant l'eau entrer dans le lagon inférieur. De même, de l'eau supplémentaire peut être pompée pour surcharger le lagon supérieur à marée haute, en utilisant de l'énergie générée par le lagon inférieur. Quel que soit l'état de la marée, l'un des deux lagons est capable de générer de la puissance. Une telle paire de lagons marémoteurs peut également servir d'installation de stockage d'énergie par pompage, qui emmagasine l'énergie en excès du réseau électrique.

Dans les eaux britanniques, les lagons marémoteurs pourraient produire $4,5 \text{ W/m}^2$ de puissance moyenne par unité de surface. Donc, si on créait des lagons couvrant en tout 800 km^2 (comme indiqué dans la figure 14.9), la puissance générée serait alors de $1,5 \text{ kWh/j}$ par personne.

Beautés de la marée

Si on additionne tout, les barrages, les lagons et les fermes exploitant le courant de marée pourraient fournir quelque chose comme 11 kWh/j par personne (figure 14.10).

La puissance des marées n'a jamais été utilisée à l'échelle industrielle en Grande-Bretagne. Il est donc difficile de savoir quels défis économiques et techniques on rencontrerait si on construisait et on maintenait des turbines marémotrices — la corrosion, l'envasement, les débris qui s'accumulent ? Mais il y a sept bonnes raisons de s'enthousiasmer pour l'énergie marémotrice dans les îles Britanniques. 1. L'énergie marémotrice est totalement prévisible. Contrairement à l'éolien et au solaire, l'énergie marémotrice est une énergie renouvelable sur laquelle on pourrait compter ; elle est présente jour et nuit, et toute l'année ; grâce à des lagons marémoteurs, l'énergie peut être stockée afin de fournir de la puissance électrique à la demande. 2. Les marées hautes et basses qui se suivent mettent environ 12 heures à faire le tour des îles Britanniques. Les courants au large d'Anglesey (Pays de Galles), d'Islay (ouest de l'Écosse), des Orcades (nord-est de l'Écosse) et de Douvres (sud-est de l'Angleterre) sont les plus forts à des moments différents. Par conséquent, prises ensemble, de telles fermes marémotrices réparties sur ces différents sites pourraient apporter une contribution plus constante à la production électrique qu'une seule ferme marémotrice prise isolément, même si la production cumulée varie quand même à la hausse et à la baisse au rythme des phases de la Lune. 3. L'énergie marémotrice restera disponible durant des millions d'années. 4. Contrairement à l'énergie photovoltaïque, elle ne nécessite pas de matériel cher pour exploiter l'énergie des marées. 5. En outre, parce que la densité de puissance d'un courant de marée typique est supérieure à celle d'un vent typique, une turbine hydrolienne de 1 MW est plus petite qu'une éolienne de 1 MW. Il n'est donc pas impossible que les turbines marémotrices soient moins chères à fabriquer que les turbines éoliennes. 6. La



FIGURE 14.9. Deux lagons marémoteurs, chacun disposant d'une surface de 400 km^2 : l'un au large de Blackpool et l'autre dans la Wash. L'estuaire de la Severn est également indiqué à titre de comparaison.

vie sous les vagues est paisible ; les tempêtes de marée, ça n'existe pas. Contrairement aux turbines éoliennes, qui imposent une coûteuse ingénierie pour faire face aux tempêtes de vent rares et violentes, il n'y aura pas besoin de prévoir de gros systèmes de sécurité pour les turbines marémotrices sous l'eau. 7. Les humains vivent pour l'essentiel sur la terre, et ils ne voient pas ce qui se passe sous l'eau. Donc les objections levées du fait de l'impact visuel des turbines marémotrices devraient être bien moins fortes que celles contre les éoliennes.

Légendes urbaines

Toute propre et verte soit-elle, l'énergie marémotrice ne devrait pas être qualifiée de renouvelable. Extraire de l'énergie des marées ralentit la rotation de la Terre. On ne peut absolument pas utiliser l'énergie marémotrice à long terme.

C'est faux. Les marées naturelles ralentissent déjà la rotation de la Terre. La perte naturelle d'énergie de rotation est d'environ 3 TW (Shepherd, 2003). Grâce à la friction naturelle des marées, chaque siècle qui passe voit la durée du jour s'allonger de 2,3 millisecondes. De nombreux systèmes de production d'énergie marémotrice ne font qu'extraire de l'énergie qui aurait de toute façon été perdue sous forme de friction. Et même si on multipliait par deux l'énergie extraite du système Terre–Lune, l'énergie marémotrice pourrait encore durer plus d'un milliard d'années.

Notes et bibliographie

Page n°

96 *La puissance d'un bassin marémoteur artificiel.* La puissance par unité de surface d'un bassin marémoteur est dérivée au chapitre G, page 365.

97 *La Grande-Bretagne est déjà dotée d'un bassin marémoteur naturel ... la mer du Nord.* Je ne devrais pas donner l'impression que la mer du Nord se vide et se remplit comme un bassin marémoteur sur la côte anglaise. Les courants de la mer du Nord sont plus complexes parce que le temps mis par une bosse d'eau pour se propager le long de la mer est du même ordre que celui qui sépare deux marées. Néanmoins, il existe des courants de marée record entrant et sortant de la mer du Nord, et aussi en son sein.

98 *La puissance totale entrante des ondes de marées lunaires qui croisent ces lignes a été mesurée à 100 kWh par jour et par personne.* Source : Cartwright et al. (1980). Pour les lecteurs amateurs de modèles de coin de table, le chapitre G montre comment estimer cette puissance à partir des premiers principes.

99 *La Rance* a produit 16 TWh en 30 ans, ce qui fait une puissance moyenne de 60 MW (sa puissance crête est de 240 MW). Le marnage peut atteindre 13,5 mètres ; la surface du bassin est de 22 km² ; le barrage fait 750 mètres de long. Sa densité de puissance moyenne est de 2,7 W/m². Source : [6xrm5q].

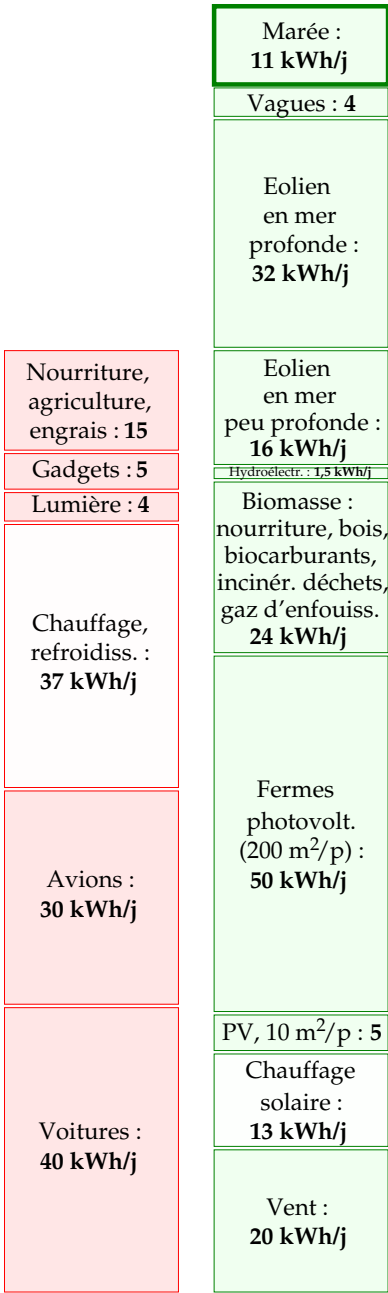


FIGURE 14.10. Marée.

- 100 *Les rapports des ingénieurs sur la proposition de barrage sur la Severn indiquent ... 17 TWh/an.* (Taylor, 2002b). Cette puissance (2 GW) correspond, en moyenne, à 5 % de la consommation totale actuelle d'électricité du Royaume-Uni.
- 101 *La puissance moyenne par unité de surface des bassins marémoteurs pourrait être de 4,5 W/m².* MacKay (2007a).

15 Les trucs

L'un des principaux aspirateurs d'énergie dans les pays « développés », c'est la création de tous les trucs qu'on achète et puis ensuite, qu'on jette. Au cours de son cycle de vie naturel, le « truc » passe à travers trois étapes successives. Tout d'abord, on donne naissance à un nouveau truc, qu'on met dans un emballage qui brille et qu'on présente à l'étalage d'un magasin. A ce stade, on appelle ce truc une « marchandise ». Dès qu'il arrive à la maison et qu'on le sépare de son emballage, s'opère en lui une soudaine transformation, qui le fait passer de l'état de « marchandise » à son second état, celui de « babiole en vrac ». La babiole en vrac vit auprès de son propriétaire pendant un certain temps, qui varie entre quelques semaines et quelques années, durant lequel celui-ci l'ignore largement, parti qu'il est dans les magasins acheter d'autres marchandises. Un jour enfin, par un miracle comme seule l'alchimie moderne sait en produire, la babiole en vrac finit par se transformer à nouveau et adopter son état final, celui de « détritrus ». Il peut être difficile à un œil non averti de distinguer l'état de « détritrus » de l'état de « marchandise » que le truc fut auparavant et qui semblait si attirant. Néanmoins, à ce stade, le délicat propriétaire paie un éboueur pour que celui-ci transporte ce truc loin de chez lui.

Imaginons qu'on veuille connaître le coût énergétique total d'un truc — peut-être dans l'idée de concevoir de meilleurs trucs. Cette démarche, c'est ce qu'on appelle une analyse de cycle de vie. Par convention, on découpe alors le coût énergétique de n'importe quoi qui va d'un sèche-cheveux à un bateau de croisière en quatre morceaux, les phases M, P, U et D :

Phase M : obtenir des matières premières. cette phase exige de dénicher et de déterrer des minerais, de les fondre, de les purifier et de les modifier pour en faire le Lego des fabricants : des plastiques, du verre, des métaux ou des céramiques, par exemple. Les coûts énergétiques de cette phase incluent les coûts de transport pour acheminer les matières premières jusqu'à leur destination suivante.

Phase P : Production. Dans cette phase, les matières premières sont transformées en un produit manufacturé. L'usine où les bobines du sèche-cheveux sont enroulées, ses lignes gracieuses moulées et ses éléments soigneusement emboîtés, consomme de la chaleur et de la lumière. Les coûts énergétiques de cette phase incluent le conditionnement et encore du transport.

Phase U : Utilisation. Sèche-cheveux et bateaux de croisière engloutissent tous deux de l'énergie quand on les utilisent pour ce pour quoi ils ont été conçus.

Phase D : Destruction. Cette phase comprend le coût énergétique induit par le fait de remettre le truc dans un trou dans le sol (mise en décharge), ou de transformer le truc en matières premières (recyclage) ;



FIGURE 15.1. Publicité pour la camelote de Selfridges.

énergie incorporée (kWh par kg)	
combustible fossile	10
bois	5
papier	10
verre	7
plastique en polyéthylène	30
aluminium	40
acier	6

TABLEAU 15.2. Énergie incorporée dans un certain nombre de matériaux.

puis de nettoyer toute la pollution associé à ce truc.

Normalement, pour déterminer la quantité d'énergie consommée durant tout la vie d'un truc, il faudrait estimer les coûts énergétiques de chacune de ces quatre phases, puis en faire la somme. Mais dans la plupart des cas, le coût énergétique total est dominé par une des quatre phases. Donc pour obtenir une estimation raisonnable du coût énergétique total, il suffit juste d'estimer de manière précise le coût de la phase dominante. Si l'on veut reconcevoir un truc pour réduire son coût énergétique total, on se concentre habituellement sur la réduction du coût de sa phase dominante, et on s'assure que les économies d'énergie obtenues sur cette phase ne sont pas annulées par une augmentation de la consommation d'énergie du même ordre sur les trois autres phases.

Plutôt que de faire une estimation détaillée de la quantité de puissance nécessaire pour produire et transporter perpétuellement tous les trucs, nous allons d'abord nous contenter de parler de quelques exemples de trucs courants : cannettes de boisson, ordinateurs, piles, prospectus, voitures et maisons. Ce chapitre se concentre sur les coûts énergétiques des phases M et P. On appelle parfois ces coûts « l'énergie grise » du truc (lorsque cela recouvre les 4 phases), ou son « énergie incorporée » (uniquement lorsque cela recouvre les 2 premières phases M et P) — des noms qui peuvent paraître curieux voire porter un peu à confusion, puisque d'habitude, cette énergie n'est ni colorée, ni littéralement incorporée au truc.

Cannettes de boisson

Supposons que vous ayez l'habitude de boire ce sympathique produit chimique international qu'est le coca à raison de cinq cannettes chaque jour, et qu'après les avoir bues, vous jetez les cannettes en aluminium à la poubelle. Pour ces trucs-là, c'est la phase des matières premières qui domine. La production de métaux est très énergivore, tout particulièrement celle de l'aluminium. Fabriquer une cannette en aluminium requiert 0,6 kWh. Donc, l'habitude de boire cinq cannettes par jour dilapide de l'énergie à un rythme de **3 kWh/j**.

Et si vous préférez l'eau de source aux sodas, sachez qu'une bouteille d'un demi-litre faite de polyéthylène (qui pèse 25 g), incorpore une énergie de 0,7 kWh, autant qu'une cannette en alu — hallucinant, non ?

Autres conditionnements

Le Britannique moyen jette 400 grammes d'emballages par jour — pour l'essentiel, des emballages alimentaires. L'énergie grise de ces emballages va de 7 à 20 kWh par kg quand on va d'un bout à l'autre de leur spectre, du verre aux conteneurs en acier en passant par le papier et les plastiques. En prenant une énergie grise typique de 10 kWh/kg, on déduit que l'empreinte énergétique du conditionnement est de **4 kWh/j**. Une petite partie



Aluminium : **3 kWh/j**



Emballages :
4 kWh/j



FIGURE 15.3. Cinq cannettes en aluminium par jour représentent 3 kWh/j. La puissance grise des autres conditionnements que le Britannique moyen balance à la poubelle est de 4 kWh/j.

de cette énergie grise peut être récupérée lors de l'incinération des déchets, comme nous le verrons dans le chapitre 27.

Ordinateurs

Fabriquer un ordinateur personnel coûte 1 800 kWh d'énergie. Donc si vous achetez un nouvel ordinateur tous les deux ans, cela correspond à une consommation de puissance de **2,5 kWh par jour**.

Piles

Fabriquer une pile rechargeable AA au nickel-cadmium, qui peut stocker 0,001 kWh d'énergie électrique et qui a une masse de 25 grammes, a un coût énergétique de 1,4 kWh (phases M et P). Si la fabrication des piles jetables a à peu près le même coût énergétique, alors jeter deux piles AA tous les mois consomme environ **0,1 kWh/j**. Le coût énergétique des piles est donc vraisemblablement un élément mineur dans votre pile rouge d'énergie consommée.

Journaux, magazines et prospectus

Un certain journal de 36 pages, distribué gratuitement dans les gares de métro et de train, pèse 90 grammes. Le *Cambridge Weekly News* (56 pages) pèse 150 grammes. *The Independent* (56 pages) pèse 200 grammes. Un magazine d'annonces immobilières de 56 pages et le *Cambridgeshire Pride Magazine* (32 pages), tous deux distribués gratuitement à domicile, pèsent respectivement 100 et 125 grammes.

Ce fleuve de papier et d'imprimés publicitaires qui se déverse chaque jour incorpore de l'énergie. Le fabriquer et le distribuer coûte également de l'énergie. Le papier a une énergie grise de 10 kWh par kg. Donc l'énergie incorporée dans un flot individuel typique de prospectus, de magazines et de journaux, se montant à 200 grammes de papier par jour (c'est l'équivalent d'un exemplaire de *The Independent* par jour, par exemple) est d'environ **2 kWh par jour**.

Recycler le papier permettrait d'économiser environ la moitié de son énergie de fabrication ; l'incinération ou la combustion du papier dans un feu individuel permettrait également de récupérer une partie de l'énergie incorporée.

Des trucs encore plus gros

Le plus gros truc que la plupart des gens achètent, c'est une maison.

Dans le chapitre H, je fais l'estimation du coût énergétique de la construction d'une nouvelle maison. En supposant que l'on remplace chaque maison tous les 100 ans, le coût énergétique estimé est de 2,3 kWh/j. Ce

Processeurs :
2,5 kWh/j



FIGURE 15.4. Elle fait des puces.
Photo : ABB.

Fabriquer un ordinateur personnel tous les deux ans coûte 2,5 kWh par jour.



Journaux,
prospectus,
magazines :
2 kWh/j

Construction de maisons :
1 kWh/j



FIGURE 15.5. Nourriture-kilomètres. Des sucreries faites à Helston, en Cornouailles, et livrées à 580 kilomètres de là, à Cambridge, pour y être consommées.

n'est que le coût énergétique de la création du *bâti* de la maison — les fondations, les briques des murs, les tuiles et les poutres du toit. Si le taux d'occupation moyen d'une maison est de 2,3, la dépense énergétique moyenne pour construire la maison est alors estimée à **1 kWh par jour et par personne**.

Qu'en est-il d'une voiture, d'une route? Certains d'entre nous possèdent la première, et en général, nous partageons tous la seconde. L'énergie incorporée d'une nouvelle voiture est de 76 000 kWh — donc si vous en changez tous les 15 ans, cela fait un coût énergétique moyenne de **14 kWh par jour**. Une analyse de cycle de vie menée par Treloar, Love et Crawford estime que la construction d'une route australienne coûte 7 600 kWh par mètre (une route en béton armé de bout en bout), et que, si on prend en compte les coûts de maintenance, le coût total sur 40 ans atteint 35 000 kWh par mètre. A partir de cette valeur, calculons un chiffre approximatif du coût énergétique des routes britanniques. Il y a 45 000 kilomètres de routes nationales en Grande-Bretagne (on exclut les autoroutes). En partant d'un coût de 35 000 kWh par mètre et par période de 40 ans, ces routes nous coûtent **2 kWh/j par personne**.

Fabrication
des voitures :
14 kWh/j

Construction de routes :
2 kWh/j



Transporter tous ces trucs

Jusqu'à présent, j'ai essayé de faire des estimations de la consommation *individuelle*. « Si vous balancez cinq canettes de coca, ça fait 3 kWh; si vous achetez *The Independent*, ça fait 2 kWh. » Mais maintenant, les choses vont devenir un peu moins personnelles. Puisque nous sommes en train d'estimer la quantité d'énergie nécessaire pour le transport à travers le pays et le monde, je vais prendre des totaux nationaux et les diviser par la

taille de la population.

Le transport par fret se mesure en tonnes-kilomètres (t-km). Si une tonne de sucres voyageant sur 580 km (figure 15.5), alors on dit que 580 t-km de transport de fret ont été effectués. L'intensité énergétique du transport routier au Royaume-Uni est d'environ **1 kWh par t-km**.

Lorsque le navire porte-conteneurs de la figure 15.6 transporte 50 000 tonnes de marchandises sur une distance de 10 000 kilomètres, il effectue 500 millions de t-km de transport de fret. L'intensité énergétique du transport de fret sur ce navire porte-conteneurs est de **0,015 kWh par t-km**. Notez à quel point le porte-conteneurs est plus efficace que la route pour le transport de fret. Toutes ces intensités énergétiques sont montrées par la figure 15.8.

Transporter ces trucs par la route

En 2006, le transport routier en semi-remorque en Grande-Bretagne atteignait 156 milliards de t-km. Partagées entre 60 millions de personnes, cela fait 7 t-km par jour et par personne, soit un coût de **7 kWh par jour et par personne** (en supposant une intensité énergétique de 1 kWh par tonne-kilomètre). Soit dit en passant, un quart de ces marchandises transportées est de la nourriture, des boissons ou du tabac.

Transporter ces trucs sur l'eau

En 2002, 560 millions de tonnes de fret ont transité par les ports britanniques. Le Centre Tyndall a calculé que la part du coût énergétique du transport maritime international qui revenait à la Grande-Bretagne était de **4 kWh par jour et par personne**.

Transporter l'eau ; vider le petit coin

L'eau, voilà un truc pas très glamour. Pourtant, on en consomme beaucoup — environ 160 litres par jour et par personne. D'un autre côté, nous fournissons environ 160 litres par jour et par personne d'eaux usées aux compagnies de traitement des eaux, via les égouts. Le coût du pompage de l'eau à travers le pays et du retraitement des eaux usées est d'environ **0,4 kWh par jour et par personne**.

Dessalement

Pour le moment, le Royaume-Uni ne dépense pas d'énergie pour dessaler l'eau de mer. Mais on parle ici ou là de créer des usines de dessalement à Londres. Quel est le coût énergétique pour transformer de l'eau salée en eau potable ? La méthode la moins énergivore est l'osmose inverse. Prenez une membrane qui ne laisse passer que l'eau, mettez de l'eau salée d'un



FIGURE 15.6. Le porte-conteneurs *Ever Uberty* au terminal portuaire de Thamesport. Photo de Ian Boyle www.simplonpc.co.uk.

Fret routier : **7 kWh/j**

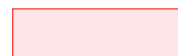
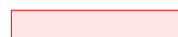


FIGURE 15.7. Ainsi le Camion livre, ainsi le Camion reprend. Coût énergétique du fret routier au Royaume-Uni : 7 kWh/j par personne.

Bateau : **4 kWh/j**



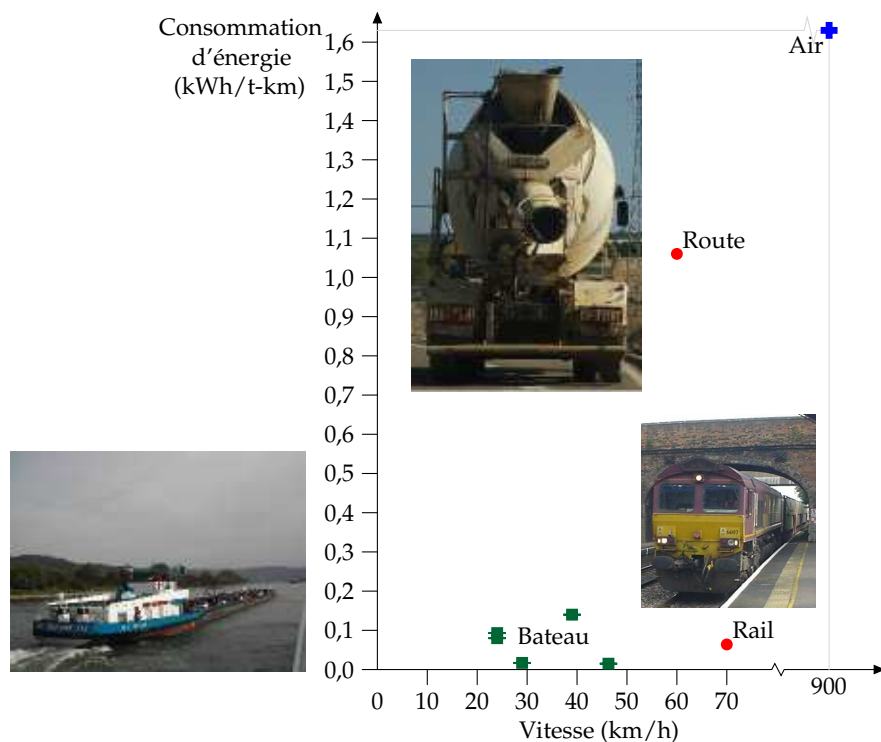


FIGURE 15.8. Besoins énergétiques de diverses formes de transport de fret. Les coordonnées verticales donnent la quantité d'énergie nette consommée en kWh par t-km (c'est-à-dire la quantité d'énergie par t-km de fret déplacé, non compris le poids du véhicule). Voir également la figure 20.23 (besoins énergétiques du transport de passagers).



Le transport sur l'eau a besoin d'énergie parce que les bateaux font des vagues. Néanmoins, le transport de fret est étonnamment efficace en énergie.

côté de la membrane, et mettez l'eau salée sous pression. A contrecœur, l'eau se met à suinter de l'autre côté de la membrane, ce qui produit de l'eau pure — à contrecœur, car l'eau pure séparée du sel a une faible entropie, et la nature préfère des états de forte entropie dans lesquels tout est mélangé. Il faut payer la purification par de l'énergie de haute qualité.

L'île anglo-normande de Jersey possède une usine de dessalement qui peut produire 6 000 m³ d'eau pure par jour (figure 15.10). En comptant les pompes qui font venir l'eau depuis la mer et la font passer à travers une série de filtres, la totalité de l'usine consomme une puissance de 2 MW. Cela fait un coût énergétique de 8 kWh par m³ d'eau produite. Consommer 160 litres de cette eau quotidiennement nécessite donc **1,3 kWh par jour**.

Fourniture et
enlèvement d'eau :
0,4 kWh/j

FIGURE 15.9. Fourniture d'eau : 0,3 kWh/j. Traitement des eaux usées : 0,1 kWh/j.

Vendre des trucs au détail

Les supermarchés britanniques consomment environ 11 TWh d'énergie par an. Partagés entre les 60 millions de joyeux clients, cela fait une puissance de **0,5 kWh par jour et par personne**.

Supermarchés :
0,5 kWh/j

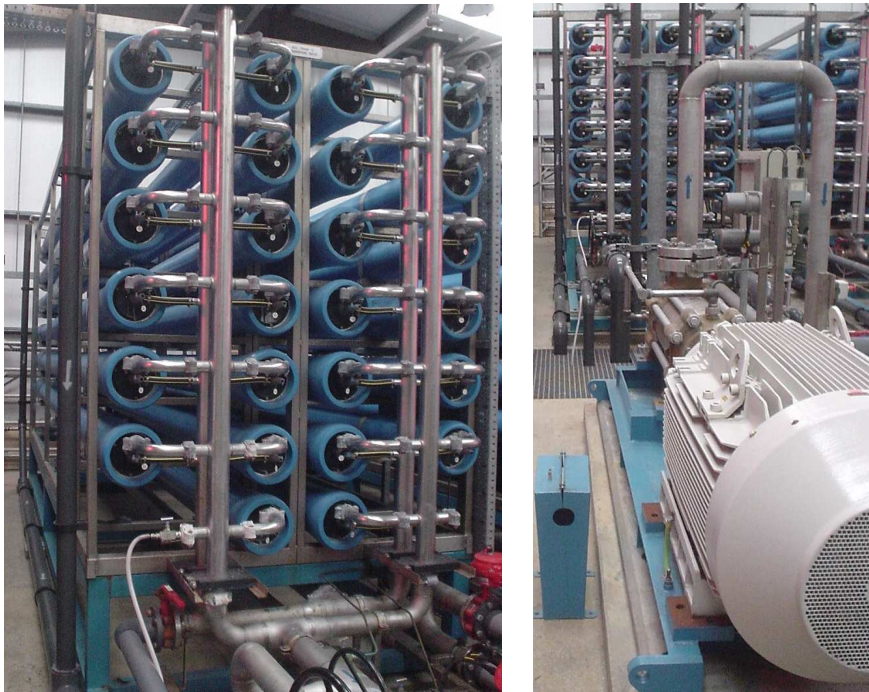


FIGURE 15.10. Une partie de l'installation à osmose inverse dans l'usine de dessalement de Jersey Water. La pompe au premier plan, à droite, a une puissance de 355 kW et comprime l'eau de mer avec une pression de 65 bars dans 39 membranes enroulées en spirale sur les bords des tubes bleus horizontaux à gauche, fournissant 1 500 m³ d'eau propre par jour. L'eau propre qui sort de cette installation a un coût énergétique total de 8 kWh par m³.

L'importance des importations

Dans les comptabilités standard de la « consommation d'énergie de Grande-Bretagne » ou de « l'empreinte carbone de Grande-Bretagne », les biens importés ne sont *pas* pris en compte. Autrefois, la Grande-Bretagne fabriquait elle-même ses propres trucs, et son empreinte par habitant en 1910 était aussi grosse que celle de l'Amérique aujourd'hui. Maintenant, la Grande-Bretagne ne fabrique plus grand chose (notre consommation d'énergie et nos émissions de carbone ont donc baissé un peu), mais on adore toujours les trucs, et on les fait fabriquer pour nous par d'autres pays. Faudrait-il ignorer le coût énergétique de fabrication de nos trucs, simplement parce qu'ils sont importés ? Je ne crois pas. Dieter Helm et ses collègues d'Oxford estiment qu'avec une comptabilité correcte, qui prend en compte les importations et les exportations, l'empreinte carbone de la Grande-Bretagne passe des « 11 tonnes équivalent CO₂ par personne » officielles à près du *double*, environ 21 tonnes. Ceci signifie que la part la plus grande de l'empreinte énergétique du Britannique moyen revient à la fabrication de tous les trucs qu'on importe.

Dans le chapitre H, j'explore encore un peu plus profondément cette idée en regardant le poids des importations britanniques. En laissant de côté les importations de combustibles, la Grande-Bretagne importe un peu plus de 2 tonnes par personne de trucs divers chaque année, dont environ 1,3 tonnes par personne sont des biens transformés et manufacturés

comme des véhicules, des machines, des appareils ménagers et des équipements électriques et électroniques. Cela fait autour de 4 kg par jour et par personne de biens manufacturés, qui sont essentiellement faits de matériaux dont la production requiert au moins 10 kWh d'énergie par kilogramme de biens. J'estime donc que cet empilement de voitures, de réfrigérateurs, de fours à micro-ondes, d'ordinateurs, de photocopieurs et de téléviseurs incorpore une puissance d'au moins 40 kWh par jour et par personne.

Pour résumer toutes ces formes de trucs et leur transport, je vais ajouter **48 kWh par jour et par personne** à la pile de consommation pour la fabrication de tous nos objets jetables (composés d'au moins 40 pour les importations, 2 pour un quotidien, 2 pour la construction de routes, 1 pour la construction de maisons, et 3 pour les emballages divers et variés) ; et je vais également ajouter **12 kWh par jour et par personne** supplémentaires pour le transport par mer, par route, par pipeline, et pour le stockage de la nourriture dans les supermarchés.

Travaillez jusqu'à acheter.
Dicton populaire

Notes et bibliographie

Page n°

- 105
- Fabriquer une cannette en aluminium requiert 0,6 kWh.* Une cannette pèse 15 g. Des estimations du coût énergétique total de la production d'aluminium varient entre 60 et 300 MJ/kg [yx7zm4], [r22oz], [yhrest]. Le chiffre que j'ai utilisé provient de *The Aluminium Association* [y5as53] : 150 MJ par kg d'aluminium (40 kWh/kg).
- *Une bouteille d'un demi-litre faite de polyéthylène.* Source : Hammond et Jones (2006) — l'énergie grise du polyéthylène est de 30 kWh par kg.
- *Le Britannique moyen jette 400 g d'emballages par jour.* En 1995, la Grande-Bretagne a consommé 137 kg d'emballages par personne (Hird et al., 1999).
- 106

Fabriquer un ordinateur personnel coûte 1 800 kWh d'énergie. La fabrication d'un PC requiert (en énergie et en matières premières) l'équivalent d'environ 11 fois son propre poids en combustibles fossiles. Les réfrigérateurs et les voitures en requièrent 1 à 2 fois leur poids. Williams (2004) ; Kuehr (2003).
- *... Une pile rechargeable AA au nickel-cadmium.* Source : Rydh et Karlström (2002).
- 105

... acier ... Selon la Swedish Steel, « la consommation de charbon et de coke est de 700 kg par tonne d'acier fini, égale à environ 5 320 kWh par tonne d'acier fini. La consommation de pétrole, de GPL et d'électricité est de 710 kWh par tonne de produit fini. La consommation totale d'énergie (primaire) est donc d'environ 6 000 kWh par tonne d'acier fini. » (soit 6 kWh par kg.) [y2ktgg]

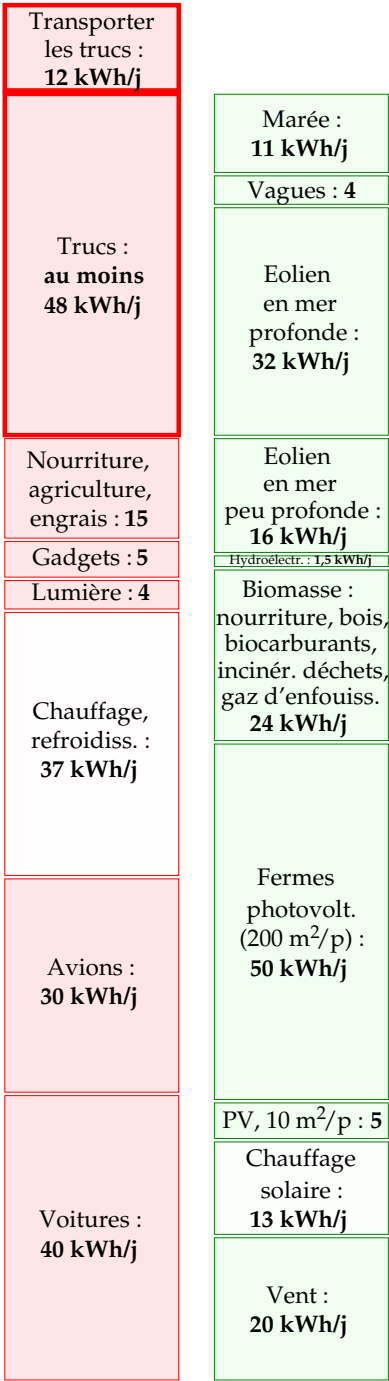


FIGURE 15.11. Fabriquer nos trucs coûte 48 kWh/j voire plus. Les acheminer et les livrer coûte 12 kWh/j.

- 107 *L'énergie incorporée d'une nouvelle voiture est de 76 000 kWh.* Source : Treloar et al. (2004). Burnham et al. (2007) donne un chiffre inférieur : 30 500 kWh pour le coût énergétique net d'une voiture sur l'ensemble de son cycle de vie. L'une des raisons pour expliquer la différence est sans doute que son analyse du cycle de vie suppose le véhicule est recyclé, ce qui réduit le coût net des matériaux.
- 106 *Le papier a une énergie grise de 10 kWh par kg.* Faire des journaux à partir de bois brut a un coût énergétique d'environ 5 kWh/kg, et le papier lui-même incorpore à peu près autant d'énergie que le bois, environ 5 kWh/kg. (Source : Ucuncu (1993) ; Erdinçler et Vesilind (1993) ; voir page 334.) Les coûts énergétiques varient selon les usines à papier et les pays. 5 kWh/kg est le chiffre trouvé par Norrström (1980) pour une imprimerie suédoise en 1973, qui estimait que des mesures d'efficacité pourraient réduire ce coût à environ 3,2 kWh/kg. Une analyse de cycle de vie plus récente (Denison, 1997) estime à 12 kWh/kg le coût énergétique net de production à partir de bois brut, puis d'un mélange classique de mise en décharge et d'incinération d'un papier journal aux États-Unis ; le coût énergétique de la production de papier journal à partir de matériau recyclé et de son recyclage est de 6 kWh/kg.
- 108 *L'intensité énergétique du transport routier au Royaume-Uni est d'environ 1 kWh par t-km.* Source : www.dft.gov.uk/pgr/statistics/datatablespublications/energyenvironment.
- *L'intensité énergétique du transport de fret sur ce porte-conteneurs est de 0,015 kWh par tonne-km.* Le *Ever Uberty* — longueur 285 m, largeur 40 m — a une capacité de 4 948 EVP, une charge en lourd de 63 000 tonnes, et une vitesse de croisière de 25 nœuds ; la puissance de son moteur en régime normal est de 44 MW. Un EVP (« équivalent vingt pieds ») est une unité standardisée de mesure de volume d'un petit conteneur de 20 pieds de long — 20 pieds sur 8 pieds de large et 8,5 pieds de haut, cela fait un peu moins de 40 m³. La plupart des conteneurs que l'on voit aujourd'hui sont des conteneurs de 40 pieds, qui ont un volume de 2 EVP. Un conteneur de 40 pieds pèse 4 tonnes et peut transporter 26 tonnes d'objets divers. En supposant que son moteur a un rendement de 50 %, la consommation d'énergie de ce navire atteint 0,015 kWh d'énergie chimique par tonne-kilomètre. www.mhi.co.jp/en/products/detail/container_ship_ever_uberty.html
 - *la part du coût énergétique du transport maritime international qui revenait à la Grande-Bretagne...* Source : Anderson et al. (2006).
- 109 **Figure 15.8. Consommation énergétique des bateaux.** Les cinq points de la figure correspondent à un porte-conteneurs (46 km/h), un vraquier (24 km/h), un supertanker (29 km/h), une péniche (24 km/h), et le NS Savannah (39 km/h).
- Vraquier** 0,08 kWh/t-km. Un vaisseau avec une capacité de stockage de céréales de 5 200 m³ a une charge en lourd de 3 360 tonnes. (La charge en lourd est la masse de cargaison que le bateau peut transporter.) Il croise à une vitesse de 13 nœuds (24 km/h), son unique moteur qui fournit une puissance de 2 MW consomme 186 g de fioul par kWh d'énergie fournie (rendement de 42 %). conoship.com/uk/vessels/detailed/page7.htm
- Supertanker** Un supertanker moderne consomme 0,017 kWh/t-km [61brab]. Poids du fret : 40 000 tonnes. Capacité : 47 000 m³. Puissance fournie par le moteur principal : 11,2 MW maximum. Vitesse à 8,2 MW : 15,5 nœuds (29 km/h). L'énergie grise de la cargaison de pétrole est de 520 millions de kWh. Donc 1 % de l'énergie du pétrole est utilisée pour transporter celui-ci sur un quart de tour de Terre (10 000 km).
- Rouliers** Les bateaux de la compagnie de transport Wilh. Wilhelmsen effectuent du transport de fret avec un coût énergétique compris entre 0,028 et 0,05 kWh/t-km [5ctx4k].
- 109 *Un coût en énergie de 8 kWh par m³ pour dessaler l'eau de mer.* Une manière plus parlante de dire les choses est de déterminer quelle augmentation de température de l'eau on obtiendrait si on injectait la même quantité d'énergie sous forme de chaleur dans le même volume d'eau. La réponse est : (8 kWh/1 000 litres)/(4,2 kJ/°C/litre) $\simeq$ 7°C. Ce résultat permet de conclure que si l'on dessale l'eau pour prendre une douche ou pour cuisiner, le coût énergétique du dessalement est vraiment ridicule comparé à la quantité d'énergie qui sera utilisée plus tard dans le cycle de vie de l'eau.

- 108 *Le coût du pompage de l'eau à travers le pays et du retraitement des eaux usées est d'environ 0,4 kWh/j par personne. La consommation totale d'énergie de l'industrie de l'eau en 2005–2006 était de 7 703 GWh. Fournir 1 m³ d'eau a un coût énergétique de 0,59 kWh. Retraiter 1 m³ d'eaux usées a un coût énergétique de 0,63 kWh. Pour tous ceux que les émissions de gaz à effet de serre intéressent, l'approvisionnement en eau a une empreinte de 289 g de CO₂ par m³ d'eau distribuée, et le traitement des eaux usées 406 g de CO₂ par m³ d'eaux usées. La consommation domestique d'eau est de 151 litres par jour et par personne, et la consommation d'eau totale est de 221 litres par jour et par personne. Les fuites s'élèvent à 57 litres par jour et par personne. Sources : Bureau des affaires scientifiques et techniques du Parlement britannique [www.parliament.uk/documents/upload/postpn282.pdf], Water UK (2006).*
- 109 *Les supermarchés britanniques consomment environ 11 TWh/an. [yqbz13]*
- 110 *Dieter Helm et al. suggèrent qu'en prenant en compte les importations et les exportations, l'empreinte carbone de Grande-Bretagne est presque **multipliée par deux**, pour atteindre environ 21 tonnes. Helm et al. (2007).*



16 Géothermie

L'énergie géothermique provient de deux sources : d'une part, de la désintégration radioactive qui a lieu dans la croûte terrestre, et d'autre part, de la lente évacuation de la chaleur provenant du cœur de la Terre et traversant le manteau terrestre. Il y a de la chaleur dans le cœur parce qu'autrefois, la Terre était brûlante, et qu'aujourd'hui, elle est toujours en train de se refroidir et de se solidifier. La chaleur du cœur est également entretenue par la friction des marées : la Terre se déforme en réponse aux champs gravitationnels de la Lune et du Soleil, de la même manière qu'une orange change de forme lorsque vous la pressez et que vous la roulez entre vos mains.

La géothermie est une énergie renouvelable attrayante parce qu'elle est « toujours là », quel que soit le temps qu'il fait ; si on fabrique des centrales géothermiques, on peut les démarrer ou les arrêter quand on veut pour suivre la demande.

Mais combien y a-t-il de puissance géothermique disponible ? On peut distinguer deux types de puissance géothermique dont on peut faire l'estimation : d'une part, la puissance disponible à un lieu quelconque sur la croûte terrestre, et d'autre part, la puissance disponible dans des points chauds particuliers comme l'Islande (figure 16.3). Même si les meilleurs endroits pour commencer à développer la technologie géothermique sont certainement les points chauds, je vais supposer que la ressource totale la plus grande provient des sites ordinaires, puisqu'ils sont considérablement plus nombreux.

La difficulté que l'on rencontre quand on veut obtenir de la puissance géothermique *durable*, c'est que la vitesse à laquelle la chaleur voyage à l'intérieur de la roche solide limite le rythme auquel la chaleur peut être durablement aspirée de l'intérieur brûlant de la Terre. C'est comme essayer de boire à la paille un verre rempli de glace pilée. Si vous plongez la paille dans la glace et que vous aspirez, vous commencez par obtenir une bonne gorgée de liquide froid. Mais si vous continuez, vous finirez par n'aspirer que de l'air. Vous aurez aspiré tout le liquide de la glace qui entourait le bout de la paille. Votre rythme initial d'aspiration n'était pas durable.

Si vous faites un trou de 15 kilomètres de profondeur dans la terre et que vous y plantez une paille, vous trouverez l'endroit chaud et douillet, en tout cas bien assez chaud pour faire bouillir de l'eau. Vous pourrez donc y planter deux pailles, envoyer de l'eau froide dans l'une et aspirer de l'eau chaude par l'autre. Vous aspirerez de la vapeur, et vous pourrez faire fonctionner une centrale électrique. Va-t-elle produire de la puissance sans limite ? Non. A force d'aspirer de la chaleur de la roche, vous aurez fait baisser la température de cette roche. Votre aspiration n'était pas durable. Il va alors vous falloir attendre un long moment avant que la roche au bout de vos deux pailles se réchauffe à nouveau. Une attitude pos-

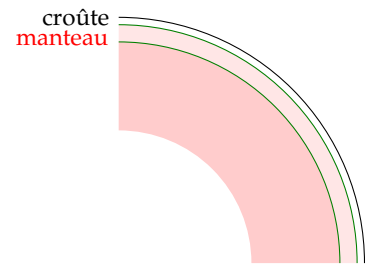


FIGURE 16.1. Une Terre en coupe.



FIGURE 16.2. Du granite.



FIGURE 16.3. Puissance géothermique en Islande. La production moyenne d'électricité géothermique en Islande (300 000 habitants) en 2006 était de 300 MW (soit 24 kWh/j par personne). Plus de la moitié de l'électricité islandaise est utilisée pour la production d'aluminium. Photo par Gretar Ivarsson.

sible face à ce problème est de traiter la chaleur géothermique de la même manière que les combustibles fossiles aujourd'hui : comme une ressource minière plutôt que comme une ressource collectée de manière durable. Vivre ainsi aux dépens de la chaleur géothermique pourrait bien être préférable pour la planète, plutôt que de vivre de manière insoutenable en dépendant des combustibles fossiles. Mais cela n'en ferait-il pas une autre source d'énergie provisoire, qui nous donnerait juste 100 ans de vie non durable de plus ? Dans ce livre, ce qui m'intéresse le plus, c'est l'énergie *durable*, comme son titre l'indique. Faisons le calcul.

De la puissance géothermique qui serait durable pour toujours

Commençons par imaginer que l'on va exploiter l'énergie géothermique de manière durable en plantant des pailles dans le sous-sol à une profondeur adéquate, puis qu'on va aspirer *doucement*. Aspirer à un rythme tel que la roche au bout de nos pailles ne puisse pas se refroidir. Cela signifie aspirer au rythme naturel auquel la chaleur se diffuse aujourd'hui à travers la terre.

Comme je le disais précédemment, l'énergie géothermique provient de deux sources : de la désintégration radioactive dans la croûte terrestre, et de la lente évacuation de chaleur provenant du cœur de la Terre et traversant le manteau terrestre. Dans un continent typique, le flux de chaleur qui provient du cœur de la Terre et traverse le manteau est d'environ 10 mW/m². Le flux de chaleur à la surface est de 50 mW/m². Ainsi, la

un milliwatt (1 mW) est égal à 0,001 W.

désintégration radioactive ajoute 40 mW/m^2 supplémentaires au flux de chaleur qui provient du cœur.

Donc, sur un site typique, la puissance maximum que l'on puisse obtenir par unité de surface est de 50 mW/m^2 . Mais cette puissance n'est pas de haute qualité. C'est de la chaleur de basse qualité, qui perce, remonte lentement et atteint la température ambiante de la surface où nous nous trouvons. Ce que nous voulons faire, vraisemblablement, c'est produire de l'électricité, et c'est la raison pour laquelle il nous faut creuser. La chaleur n'est utile que si elle provient d'une source dont la température est plus élevée que la température ambiante. La température augmente avec la profondeur, comme le montre la figure 16.4, pour atteindre une température d'environ 500°C à une profondeur de 40 kilomètres. Entre la surface où le flux de chaleur est le plus important mais où les roches sont trop froides, et 40 kilomètres de profondeur, où les roches sont les plus chaudes, mais où le flux de chaleur est 5 fois plus faible (parce qu'on passe à côté de toute la chaleur générée par la désintégration radioactive), il y a une profondeur optimale à laquelle nous devons aspirer. La profondeur optimale exacte dépend du type de machine que nous utilisons pour aspirer et générer de l'électricité. On peut déterminer la puissance maximale durable en déterminant la profondeur optimale, en supposant que nous disposons d'un moteur idéal pour convertir la chaleur en électricité, et en supposant que forer à n'importe quelle profondeur est possible et ça ne coûte pas d'énergie.

Pour le profil de température que montre la figure 16.4, j'ai calculé que la profondeur optimale était d'environ 15 km. Dans ces conditions, un moteur calorifique idéal pourrait fournir 17 mW/m^2 . Avec une densité de la population mondiale de 43 habitants par kilomètre carré, cela fait 10 kWh par jour et par personne, si *absolument toutes* les surfaces de terres sont exploitées. Au Royaume-Uni, la densité de population est 5 fois plus grande, donc une puissance géothermique de ce type, durable pour toujours et déployée à grande échelle, pourrait fournir au plus **2 kWh par jour et par personne**.

C'est le chiffre « durable pour toujours » qui ignore les points chauds, suppose des centrales de conversion d'énergie parfaites, suppose que chaque mètre carré du continent est exploité, et suppose que le forage ne coûte rien. Et aussi qu'il est possible de forer des trous de 15 kilomètres de profondeur.

Une exploitation minière de la géothermie

L'autre stratégie géothermique consiste à considérer la chaleur comme une ressource minière à exploiter. Pour « l'extraction géothermique stimulée » à partir des roches chaudes fracturées (figure 16.5), on commence par forer jusqu'à une profondeur de 5 ou 10 km, et ensuite par fracturer la roche en y injectant de l'eau. (Cette étape peut provoquer des tremble-

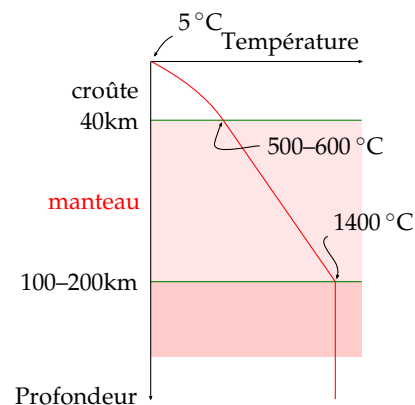


FIGURE 16.4. Profil de température dans un continent typique.

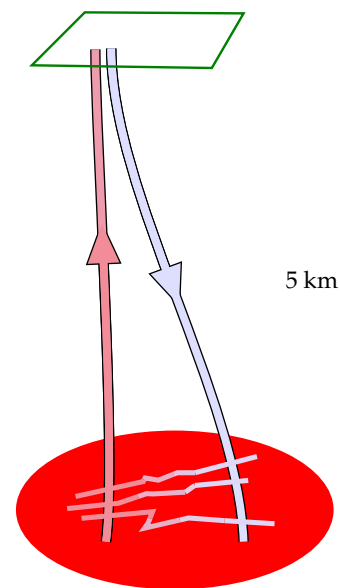


FIGURE 16.5. Extraction géothermique stimulée à partir de roches chaudes fracturées. Un puits est foré et pressurisé pour créer des fractures dans la roche. Un second puits est foré à l'autre extrémité de la zone de fractures. Puis de l'eau froide est injectée dans un des puits, et de l'eau chauffée (en fait, de la vapeur) est aspirée de l'autre puits.

ments de terre, ce qui risque de mécontenter quelque peu les riverains.) Puis on fore un second puits dans la zone de fractures. On peut alors injecter de l'eau dans l'un des puits et extraire de l'eau surchauffée ou de la vapeur de l'autre puits. Cette vapeur peut être ensuite utilisée pour produire de l'électricité ou fournir de la chaleur.

Quelle est la ressource en roches chaudes fracturables au Royaume-Uni ? Malheureusement, le pays est bien mal doté en la matière. La plupart de ces roches chaudes sont concentrées en Cornouailles, où quelques expériences de géothermie ont été menées en 1985 dans une installation de recherche à Rosemanowes, aujourd'hui fermée. Les consultants qui avaient évalué ces expériences avaient conclu que « il est improbable que la production d'électricité à partir de roches chaudes fracturées puisse être viable sur le plan technique ou commercial à court ou moyen terme, que ce soit en Cornouailles ou ailleurs au Royaume-Uni. » Néanmoins, à combien se monte la ressource ? L'estimation la plus élevée de la ressource en roches chaudes fracturables au Royaume-Uni représente une énergie totale de 130 000 TWh, ce qui, selon les consultants, pourrait, en théorie, contribuer à hauteur de 1,1 kWh par jour et par personne d'électricité pendant environ 800 ans.

D'autres sites dans le monde disposent de roches chaudes fracturables plus prometteuses. Par conséquent, si vous voulez connaître les réponses géothermiques pour d'autres pays, assurez-vous de poser la question à quelqu'un du coin. Mais malheureusement pour la Grande-Bretagne, la géothermie ne pourra jamais compter que pour une toute petite part.

Southampton n'utilise-t-elle pas déjà l'énergie géothermique ? Combien cela lui fournit-il ?

Oui, le système de chauffage géothermique de Southampton, dans le Hampshire était, du moins en 2004, le seul système de chauffage géothermique du Royaume-Uni. Il fournit de l'eau chaude à la ville. Le puits géothermique fait partie d'un système de cogénération de chaleur, d'électricité et de refroidissement qui fournit à ses clients de l'eau chaude et de l'eau refroidie, et revend de l'électricité au réseau. L'énergie géothermique contribue à hauteur de 15 % aux 70 GWh de chaleur fournis chaque année par ce système. Au dernier recensement, Southampton comptait 217 445 habitants, donc la puissance géothermique qui était fournie à la ville était de 0,13 kWh/j par personne.



Notes et bibliographie

Page n°

- 115 *Le flux de chaleur en surface est de 50 mW/m².* Le Massachusetts Institute of Technology (2006) indique une moyenne de 59 mW/m², dans une fourchette, aux États-Unis, allant de 25 mW à 150 mW. Shepherd (2003) donne 63 mW/m².

- 117 « Il est improbable que la génération de puissance électrique à partir de roches chaudes fracturées puisse être viable sur le plan technique ou commercial ». Source : MacDonald et al. (1992). Voir aussi Richards et al. (1994).
- 117 L'estimation la plus élevée de la ressource en roches chaudes fracturables au Royaume-Uni [...] pourrait, en théorie, contribuer à hauteur de 1,1 kWh par jour et par personne d'électricité pour environ 800 ans. Source : MacDonald et al. (1992).
- D'autres sites dans le monde disposent de roches chaudes fracturables plus prometteuses. Il y a une bonne étude (Massachusetts Institute of Technology, 2006) qui décrit les ressources en roches chaudes fracturables aux États-Unis. Une autre approche plus spéculative, poursuivie par les Sandia National Laboratories dans les années 1970, est de forer jusqu'au magma où règnent des températures de 600 à 1 300 °C, peut-être à 15 km de profondeur, et d'en obtenir de la puissance. Le site Web www.magma-power.com estime que la chaleur des réservoirs de magma sous le sol des États-Unis pourrait couvrir la consommation d'énergie américaine pour 500, voire 5 000 ans, et que cela pourrait être exploité de manière rentable.
 - Chauffage urbain géothermique de Southampton. www.southampton.gov.uk.

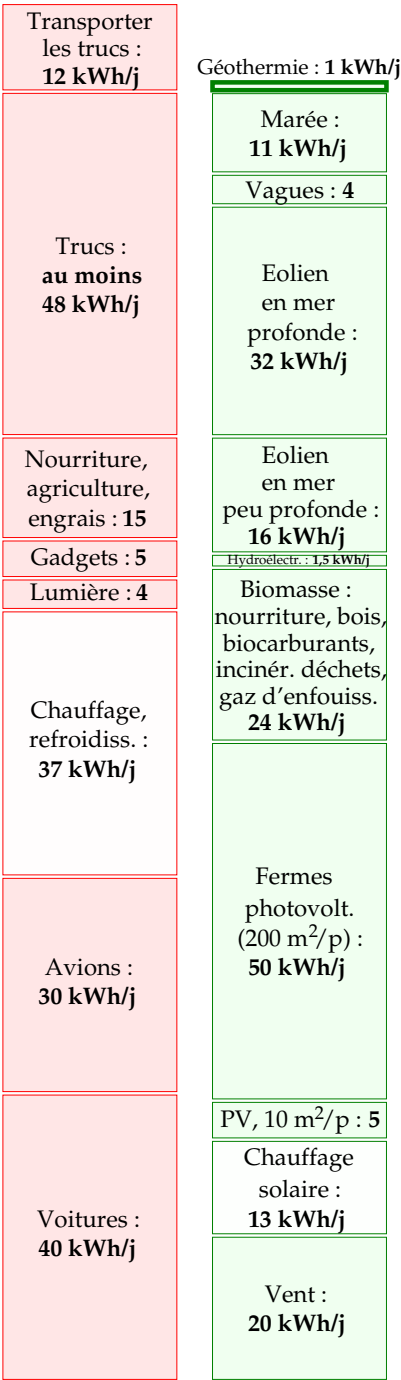


FIGURE 16.6. Géothermie.

17 Quelques services publics

Chaque arme qu'on fabrique, chaque navire de guerre qu'on envoie, chaque roquette qu'on lance signifie, au fond, un vol envers tous ceux qui ont faim et n'ont pas assez à manger, tous ceux qui ont froid et n'ont pas de quoi s'habiller.

Ce monde en armes ne dépense pas son argent tout seul. Il dépense la sueur de ses travailleurs, le génie de ses savants, l'espoir de ses enfants.

Président Dwight D. Eisenhower – avril 1953



Le coût énergétique de la « défense »

Essayons d'estimer la quantité d'énergie que nous dépensons pour notre armée.

En 2007–2008, la fraction des dépenses du gouvernement central britannique qui sont allées à la défense a été de 33 milliards de livres divisés par 587 milliards de livres (40 G€ / 700 G€), soit 6 %. Si l'on prend en compte les dépenses du Royaume-Uni pour la lutte anti-terroriste et le contre-espionnage (2,5 milliards de livres sterling, soit 3 milliards d'euros par an, en augmentation), le total des dépenses pour les activités de défense au sens large a atteint 36 milliards de livres sterling (44 milliards d'euros).

Comme estimation grossière, on peut imaginer que 6 % de ces 44 milliards d'euros correspondent à des dépenses énergétiques, à un coût de 3,3 centimes d'euro par kWh. (6 %, c'est la fraction du PIB dépensée pour l'énergie, et 3,3 centimes d'euro est le prix moyen de l'énergie.) Cela nous amène à environ 80 TWh d'énergie par an qui part à la défense : fabrication de balles, de bombes, d'armes nucléaires ; fabrication des dispositifs qui vont envoyer des balles, des bombes, des armes nucléaires ; beuglements à qui mieux mieux tout en se tenant prêt pour la prochaine partie de guerre-du-bien-contre-le-mal. Dans nos unités favorites, cela correspond à **4 kWh par jour et par personne**.



Le coût de la dissuasion nucléaire

Les dépenses financières des États-Unis pour la fabrication et le déploiement d'armes nucléaires entre 1945 et 1996 ont été de 5 500 milliards de dollars (en dollars de 1996).

Les dépenses pour les armes nucléaires sur cette période ont été plus élevées que les dépenses fédérales cumulées pour l'éducation ; l'agriculture ; la formation, l'emploi et les services sociaux ; les ressources naturelles et l'environnement ; la science, l'espace et la technologie ; le dévelop-

pement régional et communautaire (y compris les opérations de secours) ; la police ; la production et la réglementation énergétiques.

Si, encore une fois, on suppose que 6 % de ces dépenses sont allés à l'énergie avec un coût de 0,05 dollar par kWh, on trouve que le coût énergétique pour disposer d'armes nucléaires a été de 26 000 kWh par Américain, soit **1,4 kWh par jour et par Américain** (partagés entre 250 millions d'Américains sur 51 ans).

Quelle quantité d'énergie aurait été fournie aux heureux destinataires, si toutes ces armes nucléaires avaient été utilisées ? On mesure les énergies des plus grosses armes thermonucléaires développées par les États-Unis et l'Union soviétique en mégatonnes de TNT. Une tonne de TNT correspond à 1 200 kWh. La bombe qui a détruit Hiroshima avait une énergie de 15 000 tonnes de TNT (18 millions de kWh). Une bombe d'une *mégatonne* délivre une énergie de 1,2 milliards de kWh. Si on la larguait sur une ville d'un million d'habitants, une bombe d'une mégatonne serait un don d'énergie moyen de 1 200 kWh par personne, équivalant à 120 litres d'essence par personne. L'énergie totale de l'arsenal nucléaire américain est aujourd'hui de 2 400 mégatonnes, contenues dans 10 000 têtes nucléaires. Dans le bon vieux temps, lorsque les gens prenaient encore la défense vraiment au sérieux, l'énergie de l'arsenal était de 20 000 mégatonnes. Ces bombes, si on les avait utilisées, auraient fourni une énergie d'environ 100 000 kWh par Américain. C'est l'équivalent de 7 kWh par jour et par personne pendant une durée de 40 ans — une quantité semblable à toute l'énergie électrique que le nucléaire fournit aux États-Unis.

Fabrication des matériaux nucléaires pour la bombe : le coût énergétique

Les principaux matériaux nucléaires sont le plutonium, que les États-Unis ont produit à hauteur de 104 tonnes, et de l'uranium de qualité militaire (UQM), dont les États-Unis ont produit 994 tonnes. Fabriquer ces matériaux requiert de l'énergie.

Les installations de production de plutonium les plus efficaces consomment 24 000 kWh de chaleur pour produire 1 gramme de plutonium. Donc le coût énergétique direct de la fabrication des 104 tonnes de plutonium par les États-Unis entre 1945 et 1996 a été d'au moins 2 500 milliards de kWh, ce qui fait 0,5 kWh par jour et par personne (si on les partage entre les 250 millions d'Américains).

Le principal coût énergétique de la fabrication de l'UQM est le coût d'enrichissement de l'uranium : séparer les atomes de ²³⁵U et de ²³⁸U contenus dans l'uranium naturel, pour créer un produit final qui est plus riche en ²³⁵U, ne se fait pas juste en deux coups de cuiller à pot. La production américaine des 994 tonnes d'UQM (le total des États-Unis entre 1945 et 1996) a eu un coût énergétique d'environ 0,1 kWh par jour et par personne.

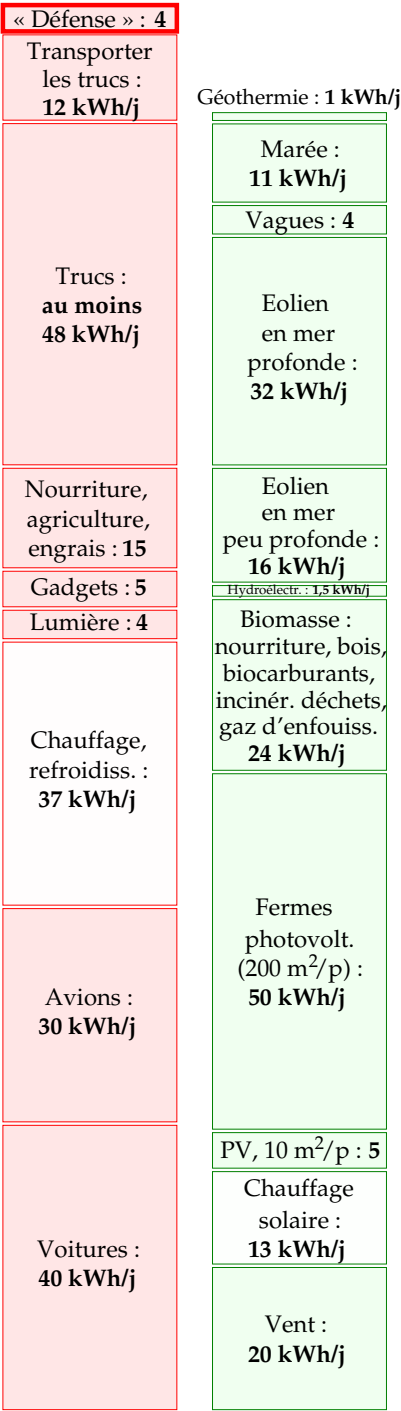


FIGURE 17.1. Le coût énergétique de la défense au Royaume-Uni est estimé à environ 4 kWh par jour et par personne.

« [Le système d'arme nucléaire] Trident crée des emplois. »
 Eh bien, c'est aussi ce qu'on fait quand on remplit nos écoles d'amiante,
 mais ça ne veut pas dire que c'est ce qu'il faudrait faire !

Marcus Brigstocke

Universités

Selon le supplément Enseignement supérieur du Times (30 mars 2007), les universités britanniques consomment 5,2 milliards de kWh par an. Partagés entre toute la population britannique, cela fait une puissance de **0,24 kWh par jour et par personne**.

Il semble par conséquent que l'enseignement supérieur et la recherche aient un coût énergétique beaucoup plus faible que les petits jeux de guerre défensive.

Il existe sans doute d'autres services publics consommateurs d'énergie dont nous pourrions parler, mais j'aimerais à présent siffler la fin de la course entre nos deux piles rouges et vertes.

Notes et bibliographie

Page n°

119 *Budget énergétique chez les militaires*. Le budget du Royaume-Uni peut être trouvé sur [yttg7p] ; la Défense reçoit chaque année 33,4 milliards de livres sterling [fcqfw] et la lutte contre le terrorisme et le contre-espionnage 2,5 milliards de livres sterling [2e4fcs]. Selon la page 14 du programme de dépenses du gouvernement britannique sur 2007–2008 (*Government's Expenditure Plans 2007/08*) [33x5kc], le « budget total des ressources » du ministère de la Défense représente une somme plus importante, 39 milliards de livres sterling, dont 33,5 milliards partent sous la forme d'une « provision pour capacités de défense » et 6 milliards pour le paiement des soldes et pensions des forces armées et les pensions de guerre. Une analyse de ce budget peut être trouvée ici : [35ab2c]. Voir aussi [yg5fsj], [yfgjna], et www.conscienceonline.org.uk.

L'armée américaine publie également sa consommation d'énergie : « Le ministère de la Défense est le plus grand consommateur individuel d'énergie aux États-Unis. En 2006, il a dépensé 13,6 milliards de dollars pour acheter 110 millions de barils de carburant pétrolier [environ 190 milliards de kWh] et 3,8 milliards de kWh d'électricité » (Department of Defense, 2008). Ce chiffre décrit la consommation directe de carburants et d'électricité, et ne prend pas en compte l'énergie grise des joujoux des militaires Si on les partage entre les 300 millions d'Américains, cela revient à **1,7 kWh/j par personne**.

- *Les dépenses des États-Unis pour la fabrication et le déploiement des armes nucléaires entre 1945 et 1996 ont été de 5 500 milliards de dollars (en dollars de 1996)*. Source : Schwartz (1998).



120 Le coût énergétique de la production de plutonium. [s1bae].

- *La production américaine de 994 tonnes d'UQM...* Les matériaux enrichis à entre 4 ou 5 % de ^{235}U sont appelés uranium faiblement enrichi (UFE, ou LEU en anglais, pour *low-enriched uranium*). L'uranium enrichi à 20 % ou plus est appelé uranium hautement enrichi (UHE, ou HEU en anglais, pour *high-enriched uranium*). Et lorsque son taux d'enrichissement atteint ou dépasse 90 %, il est appelé uranium de qualité militaire (UQM, ou WGU en anglais, pour *weapon-grade uranium*). Il faut trois fois plus de travail pour enrichir l'uranium de son état naturel jusqu'à l'état d'UFE à 5 % de ^{235}U , que pour enrichir de l'UFE pour obtenir de l'UQM à 90 %. L'industrie nucléaire mesure ces besoins énergétiques avec une unité appelée unité de travail de séparation (UTS, ou SWU en anglais pour *separative work unit*). L'obtention d'un kilogramme de ^{235}U sous la forme d'UQM requiert environ 232 UTS. L'obtention d'un kilogramme de ^{235}U sous la forme d'UFE (donc dans 22,7 kg d'UFE) requiert environ 151 UTS. Dans les deux cas, on part d'uranium naturel (contenant 0,71 % de ^{235}U) et on se débarrasse de l'uranium appauvri qui contient 0,25 % de ^{235}U .

Le marché du combustible nucléaire commercial valorise une UTS à environ 100 dollars US. Il faut environ 100 000 UTS d'uranium enrichi pour alimenter un réacteur nucléaire commercial typique de 1 000 MW pendant un an. Deux méthodes d'enrichissement de l'uranium sont actuellement utilisées sur le plan commercial : la diffusion gazeuse et la centrifugation. Le processus de diffusion gazeuse consomme environ 2 500 kWh par UTS, alors que les usines de centrifugation modernes n'exigent qu'environ 50 kWh par UTS. [yh45h8], [t2948], [2ywzæe]. Une centrifugeuse moderne produit environ 3 UTS par an.

La production des États-Unis de 994 tonnes d'uranium de qualité militaire (total pour les États-Unis entre 1945 et 1996) a nécessité 230 millions d'UTS, ce qui représente 0,1 kWh/j par personne (en supposant qu'il y a eu 250 millions d'Américains, et en prenant 2 500 kWh par UTS comme coût de l'enrichissement par diffusion gazeuse).



18 Peut-on vivre uniquement sur les renouvelables ?

La pile rouge de la figure 18.1 s'élève à **195 kWh par jour et par personne**. La pile verte s'élève à environ **180 kWh par jour et par personne**. La course est serrée ! Mais rappelez-vous : dans le calcul de notre pile de production nous avons balayé toutes les contraintes économiques, sociales et environnementales. En outre, certains de nos apports verts sont probablement incompatibles entre eux : nos panneaux photovoltaïques et nos panneaux d'eau chaude seraient en concurrence les uns avec les autres sur les toits et nos centrales solaires photovoltaïques couvrant 5 % du pays entreraient en concurrence avec les cultures énergétiques dont nous avons couvert 75 % du pays. Si nous devions abandonner un seul de nos plus grands apports verts — par exemple, si nous décidions que l'éolien en haute mer n'est pas une option possible, ou que quadriller 5 % du pays avec des panneaux photovoltaïques pour un coût de 250 000 euros par personne n'est pas possible — alors la pile de production n'égalerait plus la pile de consommation.

En outre, même si notre pile rouge de consommation était inférieure à notre pile verte de production, cela ne signifierait pas forcément que le compte de nos petites sommes d'énergie soit bon. Impossible d'allumer la télévision avec de la nourriture pour chat, ou de nourrir son chat avec une éolienne. L'énergie existe sous différentes formes — chimique, électrique, cinétique, calorique, par exemple. Pour que le compte d'un plan énergétique durable puisse être bon, il faut qu'à la fois les formes et les quantités d'énergie consommées et produites. Convertir de l'énergie d'une forme à une autre — de la chimique à l'électrique, comme dans une centrale électrique qui brûle des combustibles fossiles ; ou de l'électrique à la chimique, comme dans une usine fabriquant de l'hydrogène à partir de l'eau — cela implique généralement des pertes substantielles d'énergie utile. Nous reviendrons sur ce point important dans le chapitre 27, qui parlera de quelques plans énergétiques dont le compte est bon.

Ici, nous allons réfléchir sur nos estimations de consommation et de production, les comparer avec des moyennes officielles et des estimations faites par d'autres personnes, et discuter de la puissance que les énergies renouvelables pourraient vraisemblablement fournir dans un pays comme la Grande-Bretagne.

Les questions auxquelles nous allons tâcher de répondre dans ce chapitre sont les suivantes :

1. Est-ce que la taille de la pile rouge est à peu près correcte ? Quelle est la consommation *moyenne* de la Grande-Bretagne ? Nous allons jeter un coup d'œil aux chiffres officiels de consommation d'énergie pour la Grande-Bretagne et aussi quelques autres pays.

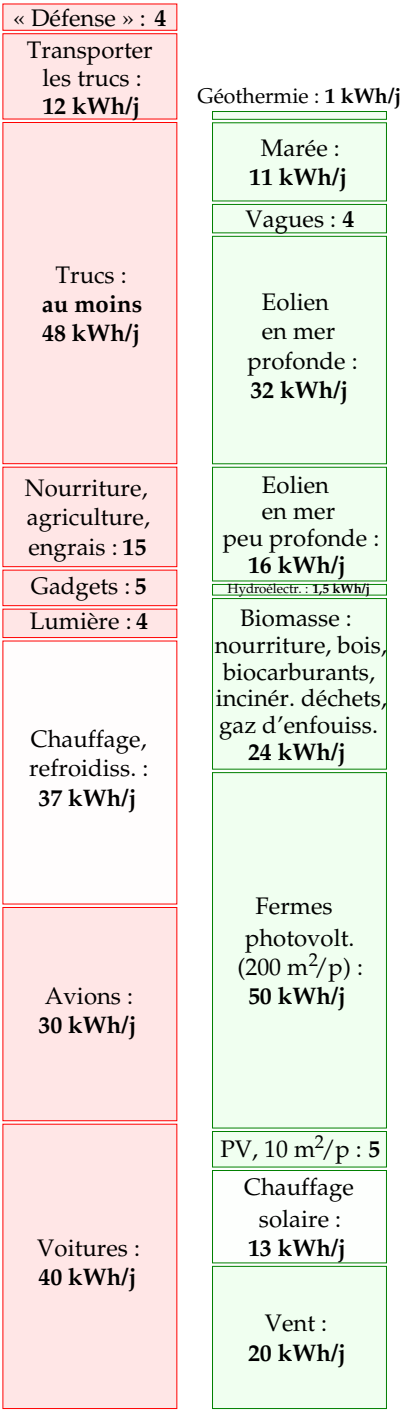


FIGURE 18.1. L'état des lieux après avoir additionné toutes les énergies renouvelables traditionnelles.

- 2. Ai-je été injuste envers les énergies renouvelables, en sous-estimant leur potentiel ? Nous allons comparer les estimations de la pile verte avec celles publiées par des organismes comme la Commission du développement durable, l'*Institution of Electrical Engineers* et le Centre pour une Technologie Alternative.
- 3. Qu'arrivera-t-il à la pile verte lorsqu'on va prendre en compte les contraintes sociales et économiques ?

Réflexions rouges

Notre estimation de la consommation type d'un individu riche (figure 18.1) s'élève à **195 kWh par jour**. Et en effet, beaucoup de gens consomment vraiment une telle quantité d'énergie, et bien plus encore d'autres aspirent à de tels niveaux de consommation. L'Américain *moyen* consomme environ **250 kWh par jour**. Si nous élevions tous notre niveau de consommation à celui d'un Américain moyen, la pile verte de production serait définitivement dépassée par la pile rouge de consommation.

Qu'en est-il de l'Européen moyen et du Britannique moyen ? La consommation « d'énergie primaire » d'un Européen moyen (ce qui signifie l'énergie contenue dans les combustibles bruts, plus l'énergie éolienne et l'hydroélectricité) est d'environ **125 kWh par jour**. Celle du Britannique moyen est aussi de **125 kWh par jour**.

Il y a deux flux d'énergie que ces moyennes officielles ne prennent pas en compte. Tout d'abord, il y a « l'énergie incorporée » dans les trucs *importés* (c'est-à-dire l'énergie dépensée à les fabriquer). Dans le chapitre 15, nous avons estimé l'énergie incorporée dans des trucs importés à au moins 40 kWh/j par personne. Ensuite, les estimations officielles de la « consommation d'énergie primaire » ne comprennent que les flux industriels d'énergie — des choses comme les combustibles fossiles et l'hydroélectricité — et elles ne gardent aucune trace de l'énergie naturellement incorporée dans les aliments : l'énergie qui a été exploitée initialement par la photosynthèse.

Une autre différence entre la pile rouge que nous avons constituée ensemble et le total national est que jusqu'à maintenant, dans la plupart des chapitres sur la consommation, nous avons eu tendance à ignorer l'énergie perdue ou consommée en la transformant d'une forme à une autre ou en la transportant. Par exemple, l'estimation du chapitre 3 pour la « voiture » ne couvrait que l'énergie contenue dans le carburant ; elle ne comptait ni l'énergie utilisée pour raffiner le carburant, ni celle utilisée pour acheminer le pétrole du puits à la raffinerie et le carburant de la raffinerie au moteur. Le total national représente toute l'énergie, avant toute perte de conversion. Les pertes de conversion représentent, en définitive, environ 22 % de la consommation totale d'énergie nationale. La plupart de ces pertes de conversion se produit dans les centrales électriques. Les pertes dans le réseau de transport d'électricité gaspillent environ 1 % de la consommation

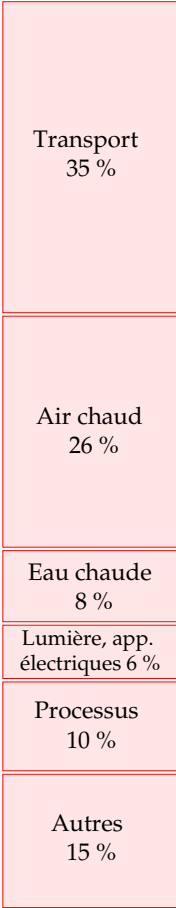


FIGURE 18.2. La consommation d'énergie, répartie par usage final, selon le ministère du commerce et de l'industrie britannique.

énergétique nationale.

En construisant notre pile rouge, nous avons essayé d’estimer combien d’énergie utilisait une personne riche type. Cette approche a-t-elle biaisé notre perception de l’importance des différentes activités ? Regardons quelques chiffres officiels. La figure 18.2 montre la répartition de la consommation d’énergie par usage final. Les deux principales catégories sont le transport et le chauffage (air chaud et eau chaude). Toutes deux étaient également les plus importantes dans notre pile rouge. Bien.

Transport routier	Pétrole	22,5
Transport ferroviaire	Pétrole	0,4
Transport par voie d’eau	Pétrole	1,0
Transport aérien	Pétrole	7,4
Tous les modes	Électricité	0,4
Énergie totale utilisée pour le transport		31,6

TABLEAU 18.3. Répartition de la consommation d’énergie par mode de transport pour 2006, en kWh/j par personne.
Source : Department for Transport (2007).

Regardons un peu plus attentivement le transport. Dans notre pile rouge, nous avons trouvé que conduire 50 km par jour en voiture avait à peu près la même empreinte énergétique que faire un aller-retour Londres –Le Cap en avion une fois par an. Le tableau 18.3 montre l’importance relative des différents modes de transport dans le bilan énergétique national. Dans les moyennes nationales, le transport par avion est inférieur au transport par route.

Les chiffres officiels de consommation de la Grande-Bretagne sont-ils comparables à ceux d’autres pays ? La figure 18.4 montre les consommations de puissance de nombre de pays et de régions, comparées à leur produit national brut (PNB). Il y a une corrélation évidente entre la consommation de puissance et le PNB : plus le PNB (par habitant) d’un pays est élevé, plus le pays consomme de puissance par habitant. Le Royaume-Uni est assez typique d’un pays au PNB élevé, entouré de l’Allemagne, de la France, du Japon, de l’Autriche, de l’Irlande, de la Suisse et du Danemark. La seule exception notable à la règle « un PNB élevé implique une consommation de puissance élevée », c’est Hong-Kong, dont le PNB par habitant est environ le même que celui de la Grande-Bretagne, mais dont la consommation de puissance est d’environ **80 kWh/j par personne**.

Le message que je retire de ces comparaisons entre pays est que le Royaume-Uni est un pays européen assez typique, et qu’il fournit donc une bonne étude de cas pour tenter de répondre à la question : « Comment un pays offrant une qualité de vie élevée peut-il obtenir son énergie de manière durable ? »

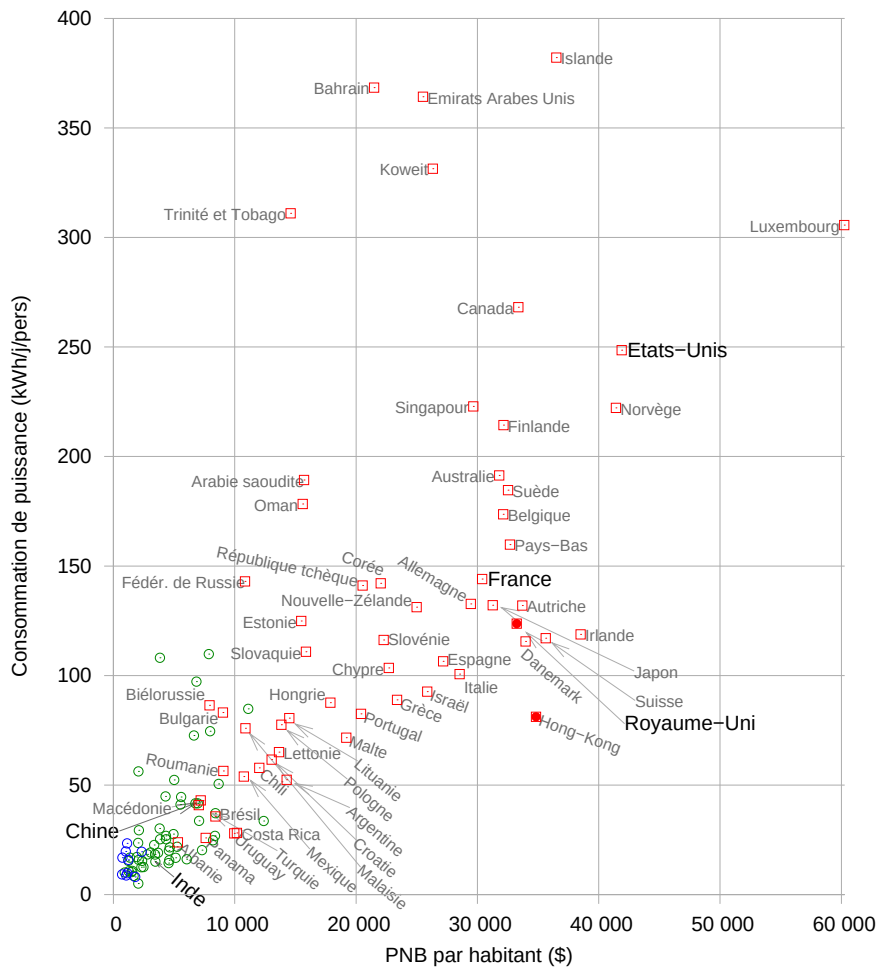


FIGURE 18.4. La puissance consommée par habitant, par rapport au PNB par habitant, en dollars US en parité de pouvoir d'achat. Les carrés correspondent aux pays à « haut développement humain » ; les cercles aux pays à développement « moyen » ou « faible ». La figure 30.1 (page 274) montre les mêmes données avec une échelle logarithmique.



FIGURE 18.5. Hong-Kong. Photo de Samuel Louie et Carol Spears.

Mes estimations	IEE	Tyndall	IAG	PIU	CAT
Géothermie : 1 kWh/j					
Marées : 11 kWh/j	Géothermie : 10 kWh/j				
Vagues : 4	Marées : 2,4	Marées : 3,9	Marées : 0,09	Marées : 3,9	Marées : 3,4
Eolien en mer profonde : 32 kWh/j	Vagues : 2,3	Vagues : 2,4	Vagues : 1,5	Vagues : 2,4	Vagues : 11,4
Eolien en mer peu profonde : 16 kWh/j					Vent en mer : 21 kWh/j
Hydroélectr. : 1,5 kWh/j	Vent mer : 6,4	Vent mer : 4,6	Vent mer : 4,6	Vent mer : 4,6	
Biomasse : nourriture, bois, biocarburants, incinér. déchets, gaz d'enfouiss. 24 kWh/j		Hydro : 0,08		Récoltes énergétiques, incinér. déchets, gaz d'enfouiss.: 31 kWh/j	Hydro : 0,5
	Déchets : 4	Récoltes énergétiques, déchets : 2	Récoltes énergétiques, gaz d'enfouiss., déchets : 3		Carburant de biomasse, déchets : 8
Fermes photovolt. (200 m²/p) : 50 kWh/j					
PV, 10 m²/p : 5		PV : 0,3	PV : 0,02	PV : 12	PV : 1,4
Chauffage solaire : 13 kWh/j					Chauffage solaire : 1,3 kWh/j
Vent : 20 kWh/j	Vent : 2	Vent : 2,6	Vent : 2,6	Vent : 2,5	Vent : 1

FIGURE 18.6. Estimations des ressources renouvelables théoriques ou pratiques au Royaume-Uni, par l’Institute of Electrical Engineers (IEE), le Centre Tyndall, le Groupe interministériel des analystes (IAG), et l’Unité de Performance et d’Innovation (PIU), et les propositions du plan « Îles Britanniques » 2027 du Centre pour une Technologie Alternative (CAT).

Réflexions vertes

On dit souvent que la Grande-Bretagne dispose de plein de sources renouvelables. Ai-je été mesquin envers le côté vert de la force ? Est-ce que mes chiffres ne sont que fumisterie ? Ai-je sous-estimé la production durable ? Commençons par essayer de comparer mes chiffres verts à plusieurs estimations trouvées dans la publication de la Commission pour un développement Durable, intitulée *Le rôle de l'énergie nucléaire dans une économie sobre en carbone. Réduire les émissions de CO₂ — Nucléaire et énergies alternatives*. Fait remarquable, même si le point de vue de cette commission sur les ressources renouvelables est très positif (« Nous disposons d'immenses ressources en marée, en houle, en biomasse et en solaire »), toutes les estimations du document de la Commission pour un développement durable sont inférieures aux miennes ! (Pour être plus précis, toutes ses estimations du total de renouvelables sont inférieures à mon total). Sa publication donne des estimations provenant des quatre sources détaillées ci-dessous (IEE, Tyndall, IAG et PIU). La figure 18.6 montre côte à côte mes estimations et les chiffres provenant de ces quatre sources, ainsi que ceux du Centre pour une Technologie Alternative (CAT). Voici une description de chacune de ces sources.

IEE L'*Institute of Electrical Engineers* a publié un rapport sur les énergies renouvelables en 2002 — un inventaire des possibilités de contribution des énergies renouvelables au Royaume-Uni. La deuxième colonne de la figure 18.6 montre le « potentiel technique » de toute une série de technologies renouvelables pour produire de l'électricité au Royaume-Uni — « une limite supérieure qui, très vraisemblablement, ne pourra pas être dépassée, même avec des changements assez radicaux dans la structure de notre société et de notre économie. » Selon l'IEE, le total de tout le potentiel technique en énergies renouvelables est d'environ 27 kWh/j par personne.

Tyndall L'estimation faite par le Centre Tyndall du total des ressources en énergie renouvelable est de 15 kWh/j par personne.

IAG Les estimations des énergies renouvelables faites par le Groupe interministériel des analystes (*Interdepartmental Analysts Group*) prennent en compte les contraintes économiques. Leur estimation de la ressource qui est économiquement rentable et qui peut être mis en exploitation (à un prix de vente au détail de 10 centimes d'euro par kWh) est de 12 kWh/j par personne.

PIU La colonne « Unité de Performance et d'Innovation » (*Performance and Innovation Unit*) indique le « potentiel indicatif de ressources pour les différentes possibilités de production d'électricité renouvelable » à partir de la contribution du ministère du commerce et de l'industrie britannique au rapport de la PIU en 2001. Pour chacune des technologies, j'indique leur « maximum qui peut être mis en exploitation »,

ou, si ce maximum en pratique n'était pas donné, leur « maximum théorique ».

CAT La dernière colonne indique les chiffres du plan « Îles Britanniques » du Centre pour une technologie alternative (Helweg-Larsen et Bull (2007)).

L'Europe à la puissance bio

Parfois, les gens me demandent : « mais on devait bien arriver à vivre correctement en se contentant de renouvelables, avant la Révolution industrielle, non ? » Oui, mais n'oubliez pas que deux choses ont changé depuis : les modes de vie et les densités de population.

Si on remonte plus de 400 ans en arrière, on constate que l'Europe vivait presque entièrement sur des ressources durables : principalement du bois et des récoltes, auxquelles s'ajoutait un peu de puissance éolienne, marémotrice et hydraulique. On a estimé que le mode de vie moyen d'une personne à l'époque consommait une puissance de 20 kWh par jour. Le bois consommé par personne était de 4 kg par jour, ce qui exigeait un hectare (10 000 m²) de forêt par personne. La surface de terres par personne en Europe dans les années 1700 était de 52 000 m². Dans les régions qui avaient les densités de population les plus élevées, la surface de terres par personne était de 17 500 m² de terres arables, de pâturages et de bois. Aujourd'hui, la surface par personne en Grande-Bretagne n'est que de 4 000 m². Donc même si on revenait à la vie du Moyen-Âge et qu'on reboisait complètement le pays, on ne pourrait plus y vivre avec les énergies renouvelables. Notre densité de population est devenue beaucoup trop élevée pour cela.

Quand les ambitions vertes rencontrent la réalité sociale

La figure 18.1 apporte de bien sombres nouvelles. Oui, techniquement, la Grande-Bretagne dispose « d'énormes » quantités d'énergie renouvelable. Mais dès qu'on veut commencer à être réaliste, je ne crois pas que la Grande-Bretagne puisse vivre juste sur ses propres renouvelables — en tous cas pas comme nous vivons aujourd'hui. Ce qui me conduit à cette conclusion est pour partie le concert de cris de rejet qui accueille chaque proposition importante pour exploiter des énergies renouvelables. Les gens adorent les énergies renouvelables, *tant que ça reste plus petit qu'une feuille de vigne*. S'il y a bien une chose pour laquelle les Britanniques sont bons, c'est pour dire « non ».

Des fermes éoliennes ? « Non, elles sont moches et bruyantes. »

Des panneaux solaires sur les toits ? « Non, ça gâcherait l'agrément visuel des rues. »

Plus de sylviculture ? « Non, cela mange la campagne. »

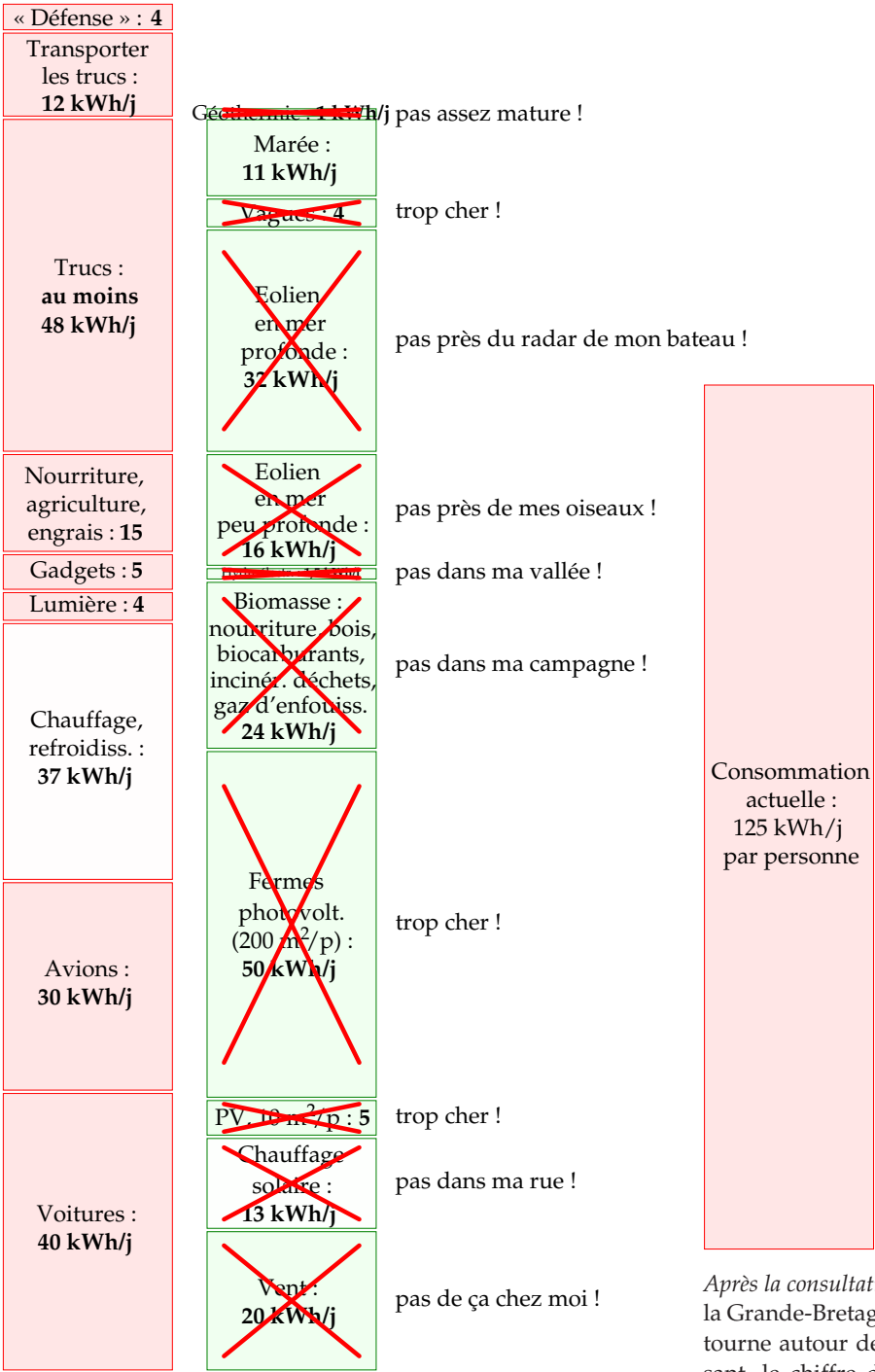
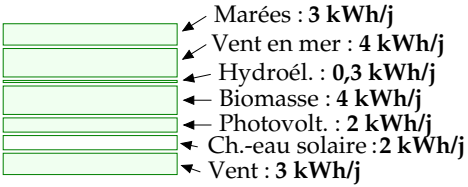


FIGURE 18.7. L'état des lieux après avoir additionné toutes les énergies renouvelables traditionnelles, puis après une consultation publique.



Après la consultation publique. Je crains que le maximum que la Grande-Bretagne puisse jamais obtenir des renouvelables tourne autour de 18 kWh/j par personne. (Soit dit en passant, le chiffre de la consommation à gauche, 125 kWh/j par personne, est la consommation britannique moyenne, en excluant les importations et en ignorant l'énergie solaire acquise par la production alimentaire.)

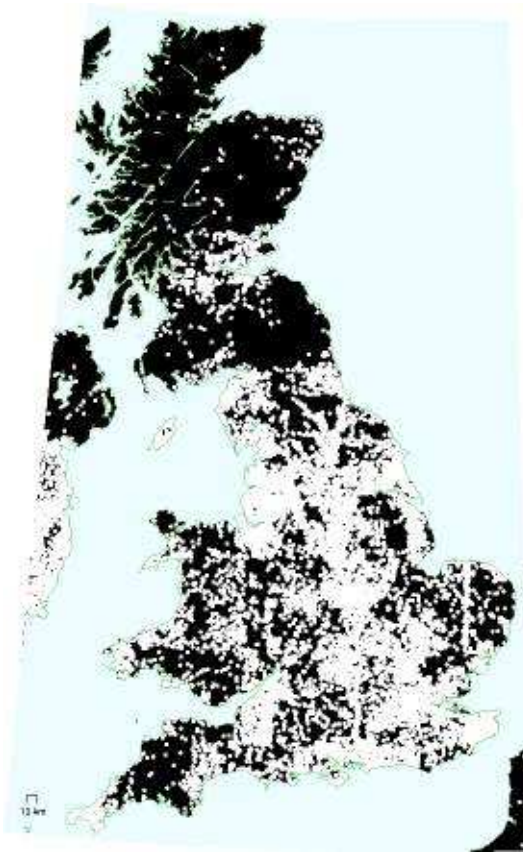


FIGURE 18.8. Où on se situe la vraie difficulté. L'une des raisons invoquées pour rejeter les éoliennes, c'est le bruit qu'elles font. J'ai découpé de cette carte de l'île principale de Grande-Bretagne une zone d'exclusion de 2 kilomètres de rayon autour de chaque hameau, village ou ville. Ces zones blanches seraient vraisemblablement exclues du développement éolien. Mais il est possible qu'une large part des zones noires restantes soient elles aussi exclues pour répondre au besoin de créer des zones paisibles sans industrialisation. Les données d'urbanisation proviennent de www.openstreetmap.org.

Incinérer les déchets ? « Non, je m'inquiète pour ma santé, pour les bouchons, pour la poussière, pour le bruit que ça va faire. »

De l'hydroélectricité ? « Oui, mais pas trop *grand* — c'est mauvais pour l'environnement. »

Des éoliennes en mer ? « Non, je suis plus inquiet d'un débarquement de lignes électriques super-moches que je ne l'étais d'une invasion nazie ».

Des vagues, de la géothermie ? « Non, c'est beaucoup trop cher. »

Après toutes ces objections, je crains que le maximum que la Grande-Bretagne puisse jamais obtenir des renouvelables soit réduit à ce que la figure 18.7 montre en bas à droite.

La figure 18.8 donne des indications à quiconque voudrait ériger des éoliennes en Grande-Bretagne. Sur une carte de l'île principale de Grande-Bretagne, j'ai indiqué en blanc une zone d'exclusion de 2 kilomètres de rayon autour de chaque hameau, village ou ville. Ces zones blanches seraient vraisemblablement exclues du développement éolien, parce qu'elles

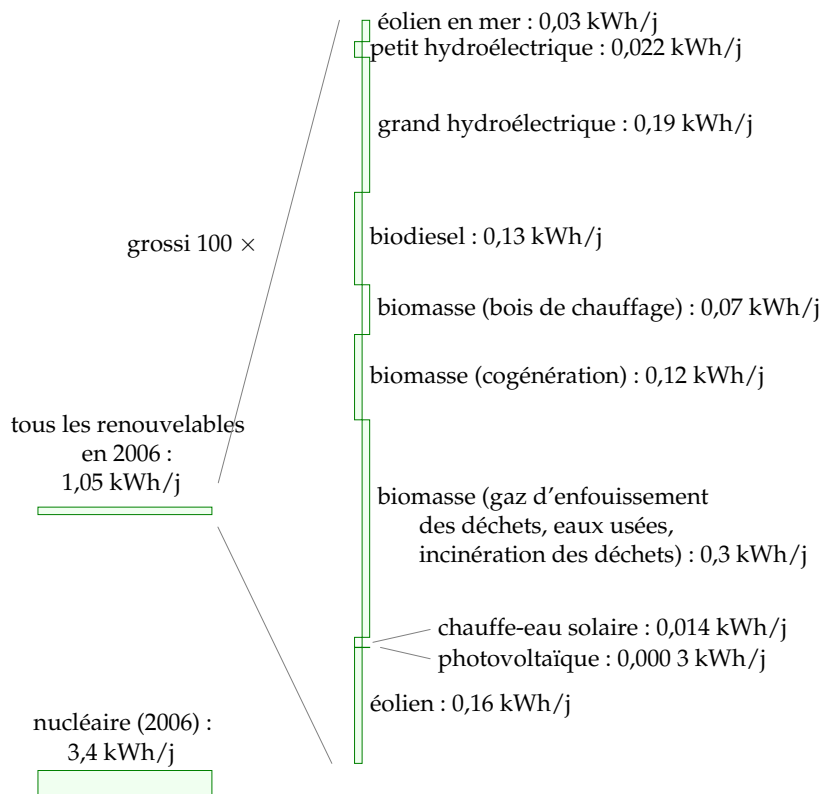


FIGURE 18.9. Production de puissances renouvelables et nucléaire au Royaume-Uni en 2006. Toutes les puissances sont exprimées par personne, comme d'habitude. La répartition des renouvelables sur la partie droite est zoomée 100 fois.

sont trop proches des habitations. J'ai également colorié en noir toutes les régions qui sont à *plus de 2 kilomètres* de toute habitation. Il est possible qu'une large part de ces zones noires soient exclues du développement éolien pour protéger *leur paix et leur sérénité*, et parce qu'il est essentiel de conserver des zones paisibles sans industrialisation. Si vous voulez créer une ferme éolienne et éviter le rejet de la population, vous pouvez prendre n'importe quelle zone sur cette carte qui n'est ni en noir, ni en blanc.

Certains de ces écologistes ont un grand cœur mais l'esprit embrouillé, et sont presque un obstacle à la lutte contre le changement climatique et la prise à bras-le-corps de ce problème.

Malcolm Wicks, ministre d'État à l'énergie

Nous approchons de la fin de notre première partie. Notre point de départ était notre volonté de nous défaire de notre dépendance aux combustibles fossiles, pour une ou plusieurs des raisons énumérées dans le chapitre 1 — changement climatique, sécurité des approvisionnements, etc. La figure 18.9 montre quelle puissance on tire aujourd'hui des énergies renouvelables et du nucléaire. Cela s'élève à seulement 4 % de toute notre consommation de puissance.

Les deux conclusions que nous pouvons tirer de cette première partie sont donc les suivantes :

- 1. *Pour faire la différence, les installations renouvelables doivent être à l'échelle du pays.*

Pour obtenir une grosse contribution de l'éolien, il nous a fallu faire appel à des fermes éoliennes grandes comme le Pays de Galles. Pour obtenir une grosse contribution du photovoltaïque, il a fallu la moitié du Pays de Galles. Pour obtenir une grosse contribution des vagues, nous avons imaginé couvrir 500 km de côtes de fermes à vagues. Pour obtenir une grosse contribution des récoltes énergétiques, nous avons compté les trois quarts de la surface du pays dédiés à cet usage. Les installations de production d'énergies renouvelables doivent être à l'échelle du pays, car toutes les énergies renouvelables sont extrêmement peu concentrées. Le tableau 18.10 résume la plupart des puissances par unité de surface dont nous avons parlé dans cette première partie.

Soutenir le mode de vie britannique avec les seules sources d'énergie renouvelables du pays serait extrêmement difficile. Une solution reposant essentiellement sur les énergies renouvelables serait nécessairement d'une très grande échelle et très intrusive.

- 2. *Il ne sera pas facile de faire un plan pour lequel le compte soit bon et qui n'utilise que des renouvelables.* Si nous voulons vraiment, sérieusement abandonner les combustibles fossiles, il va falloir que les Britanniques commencent à apprendre à dire « oui » à quelque chose. Et même à plusieurs choses.

Dans la seconde partie de ce livre, je vais essayer de répondre à la question : « dans le cas où nous ne pourrions pas obtenir une production suffisante d'énergies renouvelables pour assurer notre consommation actuelle, quelles sont les autres possibilités ? »

Notes et bibliographie

Page n°

124 *La consommation moyenne d'énergie au Royaume-Uni est de 125 kWh par jour et par personne.* J'ai pris ce chiffre du Rapport 2007 sur le développement humain du PNUD.
Le ministère du commerce et de l'industrie britannique (DTI, ou, plus récemment DBERR) publie chaque année un Recueil de statistiques sur l'énergie au Royaume-Uni (*Digest of United Kingdom Energy Statistics* ou DUKES). [uzek2]. En 2006, selon ce document, la demande totale d'énergie primaire était de 244 millions de tonnes équivalent pétrole, ce qui correspond à 130 kWh par jour et par personne.
J'ignore la raison de la petite différence entre le chiffre du PNUD et celui du DUKES, mais je peux expliquer pourquoi j'ai choisi le plus petit des deux chiffres. Comme je l'ai mentionné page 31, le DUKES utilise la même convention pour faire la somme d'énergie sous des formes différents que moi, considérant qu'un kWh d'énergie chimique est égal à un kWh d'électricité. Mais il fait une petite exception : le DUKES définit « l'énergie primaire » produite dans les centrales nucléaires comme de l'énergie thermique qui, en 2006, était de 9 kWh/j par personne ; cette quantité d'énergie y est

PUISSANCE PAR UNITÉ DE SURFACE DE TERRES OU D'EAU	
Éolien	2 W/m ²
Éolien offshore	3 W/m ²
Bassins marémoteurs	3 W/m ²
Courant de marée	6 W/m ²
Photovoltaïque	5–20 W/m ²
Plantes	0,5 W/m ²
Eau de pluie	
(hautes-terres)	0,24 W/m ²
Hydroélectricité	11 W/m ²
Géothermie	0,017 W/m ²

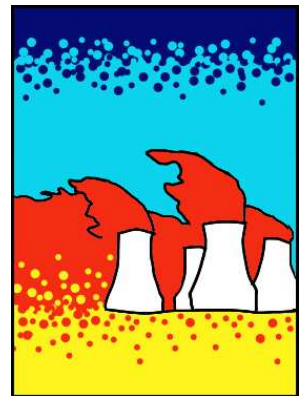
TABEAU 18.10. Les installations de production d'énergies renouvelables doivent être à l'échelle d'un pays, parce que toutes les sources d'énergies renouvelables sont extrêmement peu concentrées.

ensuite convertie (avec un rendement de 38 %) en 3,4 kWh/j par personne d'électricité fournie ; dans mes calculs, je me suis concentré sur l'électricité produite par l'hydroélectricité, les autres renouvelables et le nucléaire ; ce petit écart de convention réduit la contribution du nucléaire à environ 5 kWh/j par personne.

- 125 *Les pertes dans le réseau de transport d'électricité gaspillent 1 % de la consommation totale nationale d'énergie.* En d'autres termes, les pertes représentent 8 % de l'électricité produite. Ces 8 % de pertes peuvent être décomposés comme suit : environ 1,5 % sont perdus dans les lignes à haute-tension, et 6 % dans le réseau public de distribution locale. Source : MacLeay et al. (2007).
- 126 *Figure 18.4.* Les données proviennent du Rapport 2007 sur le développement humain du PNUD. [3av4s9]
- 129 *Au Moyen-Âge, le mode de vie moyen d'une personne consommait une puissance de 20 kWh par jour.* Source : Malanima (2006).
- 131 *« je suis plus inquiet d'un débarquement de lignes électriques super-moches que je ne l'étais d'une invasion nazie. »* Source : [6frj55].

Deuxième partie

Faire la différence



19 Chaque GRAND geste compte

Nous avons établi que le mode de vie actuel au Royaume-Uni ne peut pas être maintenu en nous contentant de nos propres ressources renouvelables (sauf en industrialisant des surfaces de terre et de mer de la taille d'un pays). Alors, quelles sont nos options, si nous voulons nous sortir de notre dépendance aux combustibles fossiles, et vivre de manière durable ? Nous pouvons équilibrer notre budget énergétique, soit en réduisant la demande, soit en augmentant l'offre, soit, bien sûr, en faisant les deux.

Ne vous faites pas d'illusions. Pour atteindre notre objectif de ne plus utiliser de combustibles fossiles, ces réductions de la demande et ces augmentations de l'offre doivent être *grandes*. Ne vous laissez pas distraire par le mythe selon lequel « chaque petit geste compte ». *Si tout le monde fait un peu, nous n'accomplirons qu'un peu*. Nous devons faire beaucoup. Ce qui est nécessaire, ce sont de *grands* changements dans l'offre et la demande.

« Mais, si 60 millions de personnes en font toutes un peu, ça va sûrement faire beaucoup, au total ? » Non. Cette calculatrice « si-tout-le-monde » est juste un moyen pour faire *paraître* grand quelque chose qui reste petit. La calculatrice « si-tout-le-monde » débite des déclarations inspirées de la forme « si *tout le monde* faisait X, alors cela fournirait suffisamment d'énergie/d'eau/de gaz pour faire Y », où Y semble impressionnant. Est-il surprenant que Y semble grand ? Bien sûr que non. On a obtenu Y en multipliant X par le nombre de personnes concernées — dans les 60 millions ! Voici un exemple tiré du « projet pour une économie verte » (*Blueprint for a Green Economy*) du Parti conservateur britannique, qui, par ailleurs, expose les choses très directement :

« Un chargeur de téléphone mobile consomme en moyenne environ ... 1 W, mais si les 25 millions de chargeurs de téléphones mobiles du pays étaient tous laissés branchés, ils consommeraient assez d'électricité (21 GWh) pour alimenter 66 000 foyers pendant un an. »

66 000 ? Dites donc, ça fait beaucoup de foyers ! Débranchez les chargeurs ! 66 000 semble énorme, mais la chose sensée à faire est de comparer avec le nombre total de foyers que nous supposons devoir participer à cet effort, à savoir 25 millions. 66 000, ça ne fait que *le quart d'un pour cent* de 25 millions. Ainsi, bien que l'assertion citée ci-dessus soit vraie, je pense qu'une façon plus pondérée de présenter la chose est la suivante :

Si vous laissez branché votre chargeur de téléphone portable, il utilise *le quart d'un pour cent* de votre électricité à la maison.

Et si tout le monde le fait ?

Si *tout le monde* laisse branché son chargeur de téléphone portable, ces chargeurs vont utiliser *un quart d'un pour cent* de leur électricité domestique.



Centrale nucléaire.

« Nous avons prévu une éolienne, mais elles ne sont pas très efficaces. »

FIGURE 19.1. Reproduit avec l'aimable autorisation de PRIVATE EYE / Robert Thompson
www.private-eye.co.uk.

La calculatrice « si-tout-le-monde » est une mauvaise chose, car elle détourne l'attention du public vers 25 millions de sardines là où il y a aussi 25 millions de requins. Le slogan « *de petits gestes peuvent faire une grande différence* », c'est de la foutaise lorsqu'on l'applique au changement climatique et à l'énergie. Il peut être vrai que « un grand nombre de gens, faisant chacun un peu, obtiennent beaucoup », si tous ces « un peu » sont d'une façon ou d'une autre concentrés en un seul « beaucoup » — par exemple, si un million de personnes donnent 10 euros à l'unique victime d'un accident, la victime reçoit 10 millions d'euros. C'est beaucoup. Mais l'énergie est une chose très différente. Nous consommons *tous* de l'énergie. Donc, pour obtenir une « grande différence » dans la consommation totale d'énergie, on a besoin que presque tout le monde fasse une « grande » différence dans sa propre consommation d'énergie.

Donc, ce qui est nécessaire, ce sont de *grands* changements dans la demande et dans l'offre. La demande en énergie pourrait être réduite de trois façons :

1. en réduisant notre population (figure 19.2) ;
2. en changeant notre mode de vie ;
3. en conservant notre mode de vie, mais en réduisant son intensité énergétique grâce à l'« efficacité » et la « technologie. »

L'offre pourrait être augmentée de trois façons :

1. Nous pourrions nous sortir des combustibles fossiles en investissant dans la technologie du « charbon propre ». Oups ! Le charbon est un combustible fossile. Ça ne fait rien — jetons quand même un œil à cette idée. Si nous utilisions du charbon « durablement » (une notion que nous allons définir dans un instant), combien d'énergie cela pourrait-il offrir ? Si nous ne nous soucions pas de durabilité et que voulons simplement « sécuriser notre approvisionnement », le charbon peut-il nous l'offrir ?
2. Nous pourrions investir dans la fission nucléaire. La technologie nucléaire actuelle est-elle « durable » ? Est-elle au moins un bouche-trou pour les 100 prochaines années ?
3. Nous pourrions acheter, mendier, ou voler de l'énergie renouvelable à d'autres pays — en gardant à l'esprit que la plupart des pays seront dans le même bateau que la Grande-Bretagne et n'auront pas de ressources renouvelables en trop ; et en gardant aussi à l'esprit que le fait de s'approvisionner en énergie renouvelable à partir d'un autre pays ne fait pas rétrécir par magie les installations nécessaires. Si nous importons de l'énergie renouvelable d'autres pays pour éviter la construction d'installations de production d'énergie renouvelable de la taille du Pays de Galles dans *notre* pays, il faudra bien construire des installations d'à peu près la taille du Pays de Galles dans ces autres pays.

Même si l'empreinte environnementale de chaque individu ne peut pas être réduite à zéro, l'absence d'individu y parvient.

Chris Rapley, ancien directeur de l'Enquête Antarctique Britannique (British Antarctic Survey)

Il nous faut moins de monde, pas des gens « plus verts ».

Daily Telegraph, 24 juillet 2007

La démocratie ne peut survivre à la surpopulation. La dignité humaine ne peut survivre à la surpopulation.

Isaac Asimov



« Il va nous falloir réduire *vos* émissions. »

FIGURE 19.2. Croissance démographique et émissions... Dessin reproduit avec l'aimable permission de Colin Wheeler.

Les sept chapitres suivants traitent d'abord de la manière dont on peut réduire sensiblement la demande, puis celle dont on peut augmenter l'offre pour répondre à cette demande, réduite mais toujours « énorme ». Dans ces chapitres, je ne citerai pas *toutes* les bonnes idées. Je discuterais seulement des *grandes* idées.

Une Grande-Bretagne schématique

Afin de simplifier et de rationaliser notre discussion sur la réduction de la demande, je me propose de travailler avec une caricature de la consommation d'énergie britannique, en omettant de nombreux détails afin de se concentrer sur les points principaux. Ma Grande-Bretagne schématique consomme de l'énergie sous seulement trois formes : chauffage, transport, et électricité. La consommation de chauffage de la Grande-Bretagne schématique est de 40 kWh par jour et par personne (provenant actuellement entièrement de combustibles fossiles) ; la consommation des transports est également de 40 kWh (eux aussi fournis par des combustibles fossiles) ; et la consommation d'électricité est de 18 kWh(e) par jour et par personne ; L'électricité est actuellement produite en quasi-totalité à partir de combustibles fossiles ; la conversion de l'énergie des combustibles fossiles en électricité a un rendement de 40 %, donc la fourniture de ces 18 kWh(e) d'électricité à la Grande-Bretagne schématique actuelle implique une consommation de combustibles fossiles de 45 kWh par jour et par personne. Cette simplification ignore certains détails de belle taille, comme l'agriculture et l'industrie, ainsi que l'énergie incorporée dans tout ce qu'on importe ! Mais je voudrais être en mesure d'avoir une *brève* discussion sur les principales actions à entreprendre pour nous passer des combustibles fossiles. Chauffage, transports et électricité représentent plus de la moitié de notre consommation d'énergie, donc si nous pouvons arriver à un modèle selon lequel le chauffage, le transport et l'électricité sont devenus durables, alors nous aurons fait une sérieuse avancée vers un programme plus détaillé dont le compte serait bon.

Maintenant que nous avons adopté ce schéma de la Grande-Bretagne, la discussion de la réduction de la demande ne portera que sur trois éléments. Tout d'abord, comment pouvons-nous réduire la demande énergétique des transports et éliminer toute utilisation de combustibles fossiles pour le transport ? C'est le sujet du chapitre 20. Deuxièmement, comment pouvons-nous réduire la demande énergétique du chauffage et éliminer toute utilisation de combustibles fossiles pour le chauffage ? C'est le sujet du chapitre 21. Troisièmement, qu'en est-il de l'électricité ? Le chapitre 22 traite de l'efficacité dans la consommation d'électricité. Trois options de production — le charbon propre, l'énergie nucléaire, et l'énergie renouvelable des autres — sont ensuite discutées dans les chapitres 23, 24 et 25. Enfin, le chapitre 26 traite des façons de faire face aux fluctuations de la demande et aux fluctuations de la production d'énergie renouvelable. Après

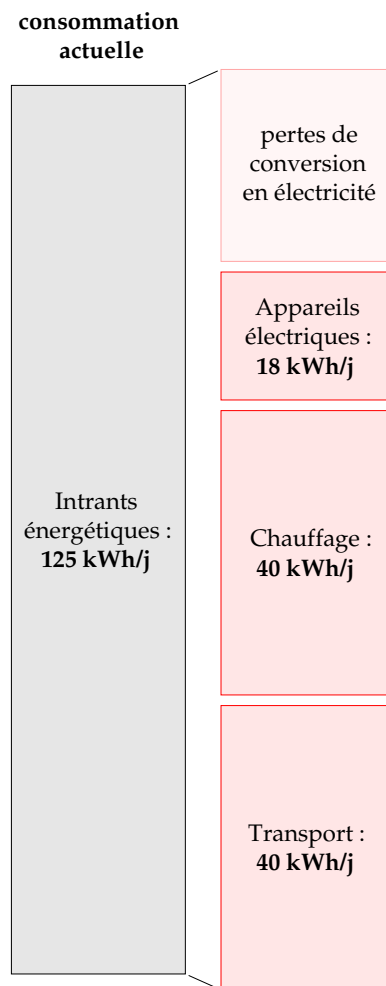


FIGURE 19.3. Consommation dans la « Grande-Bretagne schématique de 2008 ».

avoir mis en lumière les options de réduction de la demande et d'accroissement de l'offre, les chapitres 27 et 28 discutent des diverses façons de combiner ces options pour créer des plans dont le compte est bon, afin de procurer à notre Grande-Bretagne schématique son chauffage, ses transports et son électricité. Je pourrais consacrer des pages et des pages sur « les 50 actions qui vous permettraient de faire une différence », mais je crois que cette approche schématique, en allant à la pêche aux trois plus gros poissons, devrait aboutir à des stratégies plus efficaces. Mais que dire des « trucs » ? Selon la première partie de ce livre, l'énergie incorporée dans tout ce qu'on importe pourrait être le plus gros poisson de tous ! Oui, peut-être ce poisson est-il le mammoth caché sous le tapis. Mais laissons de côté la dé-fossilisation de ce mammoth, et concentrons nous sur les animaux sur lesquels nous avons un contrôle direct. Donc, allons-y : parlons transport, chauffage et électricité.

Pour le lecteur impatient

Vous êtes pressé de connaître la fin de l'histoire ? Voici un coup d'œil sur les conclusions de cette seconde partie.

Premièrement, nous électrifions les transports. L'électrification fait d'une pierre deux coups : elle permet de se passer de combustibles fossiles pour le transport, et le rend plus économe en énergie (bien sûr, l'électrification augmente notre demande en électricité verte).

Deuxièmement, pour compléter le chauffage solaire thermique, nous électrifions la plus grande partie du chauffage de l'air et de l'eau dans les bâtiments en utilisant des *pompes à chaleur*, qui sont quatre fois plus efficaces que les radiateurs électriques ordinaires. Cette électrification du chauffage augmente encore la quantité d'électricité verte nécessaire.

Troisièmement, nous produisons toute l'électricité verte à partir d'une combinaison de quatre sources : nos propres sources d'énergie renouvelable ; peut-être du « charbon propre » ; peut-être du nucléaire ; et enfin, en demandant très poliment, les énergies renouvelables d'autres pays.

Parmi les sources d'énergie renouvelables des autres pays, l'énergie solaire dans les déserts est la plus abondante. Aussi longtemps que nous pouvons établir des collaborations internationales pacifiques, l'énergie solaire des déserts des autres pays possède certainement le potentiel technique de nous fournir, de leur fournir, de fournir à tout le monde 125 kWh par jour et par personne.

Des questions ? Lisez la suite !

20 De meilleurs transports

La technologie des véhicules modernes permet de réduire les émissions liées au changement climatique sans changer l'apparence, le ressenti, ou les performances auxquels les gens ont fini par s'attendre.

Bureau de l'air de Californie (California Air Resources Board)

Environ un tiers de notre énergie va dans les transports. La *technologie* peut-elle nous permettre de réduire cette consommation ? Dans ce chapitre, nous allons explorer diverses possibilités pour atteindre deux objectifs : obtenir la plus grande réduction possible de la consommation d'énergie dans les transports, *et* éliminer l'utilisation des combustibles fossiles dans ces mêmes transports.

Les transports figuraient dans trois de nos chapitres sur la consommation : le chapitre 3 (voitures), le chapitre 5 (avions) et le chapitre 15 (fret routier et maritime). Il y a donc deux types de transports dont il faut s'occuper : le transport de passagers et le transport de fret. Notre unité de transport de passagers est le passager-kilomètre (p-km). Si une voiture transporte une personne sur une distance de 100 km, elle fournit 100 p-km de transport. Si elle transporte quatre personnes sur la même distance, elle aura fourni 400 p-km. De la même manière, notre unité de transport de marchandises est la tonne-kilomètre (t-km). Si un camion transporte 5 tonnes de fret sur une distance de 100 km, il fournit 500 t-km de transport de fret. Nous allons mesurer la consommation énergétique de transport de passagers en « kWh pour 100 passagers-kilomètres », et la consommation d'énergie du transport de fret en « kWh par tonne-km ». Notez que ces unités de mesure ont le même objet que l'unité de consommation classique des voitures, les « litres aux 100 kilomètres » : on veut *réduire* autant que possible le nombre de kWh pour 100 p-km.

Nous allons commencer ce chapitre en décrivant comment réduire la consommation d'énergie du transport de surface. Pour comprendre comment la réduire, il nous faut comprendre où va l'énergie dans ces transports. Voici les trois concepts-clés qui sont plus amplement expliqués dans le chapitre technique A.

1. Pour les *déplacements sur de courtes distances* avec de nombreux arrêts et redémarrages, l'essentiel de l'énergie est consommée pour accélérer le véhicule et ce qu'il contient. Les stratégies-clés pour consommer moins dans ce genre de mode de transport sont donc d'*alléger*, et de *rallonger la distance entre deux arrêts*. La récupération d'énergie au freinage, pour la réutiliser lors d'une accélération à venir, peut également être d'une aide appréciable. Enfin, cela facilite les choses d'*aller moins vite*, et de *moins se déplacer*.
2. Dans les *déplacements sur de longues distances* à vitesse constante, en train ou en voiture, l'essentiel de l'énergie est dépensée pour pro-



FIGURE 20.1. Le point de départ de ce chapitre : un tracteur urbain de luxe. La voiture britannique moyenne a une consommation de carburant de 8,5 litres pour 100 km, ce qui correspond à une consommation d'énergie de 80 kWh pour 100 km. Est-ce qu'on peut faire mieux ?

voquer un tourbillon d'air autour du véhicule, car il n'y a eu besoin d'accélérer celui-ci qu'une seule fois. Les stratégies-clés pour consommer moins dans ce genre de mode de transport sont donc *d'aller moins vite, de moins se déplacer et d'utiliser des véhicules longs et fins*.

3. Dans toutes les formes de déplacements, il y a une chaîne de conversion de l'énergie, qui puise de l'énergie sous la forme d'un carburant quelconque, et en utilise une partie pour faire avancer le véhicule. Inévitablement, cette chaîne de conversion énergétique a des inefficacités. Dans une voiture standard brûlant des combustibles fossiles, par exemple, seuls 25 % servent à faire avancer le véhicule, et à peu près 75 % de l'énergie sont perdus en faisant chauffer le moteur et le radiateur. Une dernière stratégie pour consommer moins d'énergie est donc de rendre la chaîne de conversion d'énergie plus efficace.

Ces constats nous amènent à énoncer six principes de conception et d'utilisation des véhicules pour un transport plus efficace en énergie : *a) réduire la surface frontale par personne ; b) réduire le poids du véhicule par personne ; c) en voyageant, avancer à une vitesse aussi constante que possible, et éviter d'utiliser les freins ; d) se déplacer moins vite ; e) moins se déplacer ; et f) rendre la chaîne énergétique plus efficace*. Nous allons maintenant parler de diverses manières d'appliquer ces principes.

Comment faire pour mieux rouler

Il y a une statistique souvent citée qui dit entre les lignes que « seulement 1 pour cent de l'énergie utilisée par une voiture sert à déplacer son conducteur » — implicitement, cela voudrait dire, sans doute, qu'en étant un peu plus malin, on pourrait fabriquer des voitures 100 fois plus efficaces ? La réponse est oui, ou presque, mais à condition d'appliquer les principes de conception et d'utilisation des véhicules listés ci-dessus à l'extrême.

Une des illustrations possibles de conception extrême de véhicules est une éco-voiture, qui a une petite surface frontale, un faible poids, et — s'il y a des records à battre — se conduit prudemment, à vitesse faible et constante. Avec un seul litre d'essence, l'éco-voiture *Team Crocodile* (figure 20.2) peut rouler 773 kilomètres à une vitesse de 24 km/h — soit une consommation de 0,13 litre aux 100 km, ou **1,3 kWh pour 100 km** ; c'est 60 fois moins que le tracteur urbain de la figure 20.1. Pesant 50 kg, encore moins haute qu'un cône de signalisation orange et blanc, elle peut confortablement loger un conducteur adolescent.

Mmmh. A mon avis, il est possible que le conducteur du tracteur urbain de la figure 20.1 puisse détecter un changement dans « l'apparence, le ressenti et la performance » de son véhicule, si on remplaçait son tracteur par cette éco-voiture, et si on lui intimait l'ordre de ne jamais dépas-



FIGURE 20.2. L'éco-voiture Team Crocodile consomme **1,3 kWh pour 100 km**. Photo gracieusement fournie par Team Crocodile.
www.teamcrocodile.com



FIGURE 20.3. « Bébés à bord ». Ce mode de transport a un coût énergétique de **1 kWh pour 100 p-km**.

ser 25 km/h. OK, donc l'idée que les voitures pourraient facilement être 100 fois plus efficaces en énergie est un mythe. Nous reviendrons dans un instant sur le défi que constitue la fabrication de voitures plus économes en énergie. Mais d'abord, voyons quelques autres manières de satisfaire les principes du transport de surface plus efficace en énergie.

La figure 20.3 montre un véhicule à plusieurs passagers qui est au moins 25 fois plus économe en énergie qu'une voiture à essence standard : un vélo. La performance du vélo (en termes d'énergie requise par unité de distance parcourue) est à peu près la même que celle de l'éco-voiture. Sa vitesse est la même, son poids est inférieur à celui de l'éco-voiture (parce que l'être humain remplace le réservoir de carburant et le moteur), mais sa véritable surface frontale est plus grande, parce que le cycliste n'est pas aussi aérodynamique que l'éco-voiture.

La figure 20.4 montre une autre possibilité pour remplacer la voiture à essence : un train qui, à pleine charge, a un cout énergétique de **1,6 kWh pour 100 p-km**. Contrairement à l'éco-voiture et au vélo, le train arrive à atteindre une efficacité remarquable, sans devoir se déplacer lentement, et sans avoir un faible poids par personne. Le train compense sa grande vitesse et sa lourde structure en exploitant le principe d'une faible surface frontale par personne. Alors qu'un cycliste ou une voiture classique ont des surfaces frontales respectives d'environ $0,8 \text{ m}^2$ et $0,5 \text{ m}^2$, le train de banlieue plein qui rejoint Cambridge à Londres a une surface frontale par passager inférieure à $0,02 \text{ m}^2$.

Houlà, mais on s'embarque dans un sujet horrible, là — l'idée que l'on puisse partager un véhicule avec « tous ces gens épouvantables ». Hé bien, mettons les pieds dans le plat, et posons clairement la question : « jusqu'à quel point pourrait-on réduire la consommation d'énergie en passant de véhicules individuels très énergivores à un excellent système de transport public intégré ? »

Les transports publics

Lorsqu'il est utilisé au mieux, le transport public partagé est de très loin plus efficace en énergie que la voiture individuelle. Un **car** à moteur Diesel, transportant 49 passagers et consommant 28 litres aux 100 km à 100 km/h, ingurgite un peu moins de **6 kWh pour 100 p-km** — 13 fois moins qu'une voiture avec une seule personne à bord. Le **trolleybus** de Vancouver consomme 270 kWh pour 100 véhicules-km, avec une vitesse moyenne de 15 km/h. Si le trolleybus contient 40 passagers à son bord, son coût de transport de passagers est de **7 kWh pour 100 p-km**. Le **Bateau-Bus** de Vancouver a un coût de transport de 83 kWh par véhicule-km à une vitesse de 13,5 km/h. Il peut accueillir 400 personnes, donc son coût de transport de voyageurs à plein est de **21 kWh pour 100 p-km**. Le **métro** de Londres, en heure de pointe, consomme **4,4 kWh pour 100 p-km** — 18 fois moins que la voiture individuelle. Même les **trains à grande vitesse**, qui



FIGURE 20.4. Ce train à 8 voitures, lancé à sa vitesse maximum de 160 km/h, consomme **1,6 kWh pour 100 passager-km**, lorsqu'il est plein.



4,4 kWh pour 100 p-km, si plein



3 à 9 kWh pour 100 places-km, si plein



7 kWh pour 100 p-km, si plein



21 kWh pour 100 p-km, si plein

FIGURE 20.5. Quelques transports publics, et leur efficacité en énergie dans le meilleur cas de figure (si toutes les places sont occupées). Le métro (extérieur et intérieur). Deux trains à grande vitesse : l'un, électrique, consomme 3 kWh pour 100 places-km ; l'autre, Diesel, 9 kWh pour 100 places-km. Trolleybus à San Francisco. Le bateau-bus à Vancouver. Photo par Larry.

violent deux de nos principes d'économies d'énergie, puisqu'ils vont deux fois plus vite qu'une voiture et qu'ils sont très lourds, sont malgré tout beaucoup plus économes en énergie : lorsque le train électrique à grande vitesse est plein, son coût énergétique est de 3 kWh pour 100 p-km — c'est 27 fois moins que pour la voiture !

Cependant, il faut être réaliste en établissant nos plans. Les trains, les bus et les cars ne sont pas toujours pleins (figure 20.6). Le coût énergétique *moyen* du transport public est donc plus important que les chiffres précédemment mentionnés, qui décrivent le meilleur des cas. Quelle est alors la consommation *moyenne* d'énergie des systèmes de transport public, et quelle évaluation réaliste peut être faite de leur performance en la matière ?

En 2006–2007, le coût énergétique total de toutes les installations de métro de Londres, y compris l'éclairage, les ascenseurs, les entrepôts et les ateliers, était de 15 kWh pour 100 p-km — cinq fois mieux que notre voiture de base. En 2006–2007 le coût énergétique de tous les autobus de Londres était de 32 kWh pour 100 p-km. Tout ne se résume pas au coût énergétique, évidemment. Les passagers se soucient aussi de la vitesse : les rames de métro roulent à des vitesses plus élevées (en moyenne 33 km/h) que les autobus (18 km/h). Les gestionnaires se soucient des coûts financiers : par passager-km, les coûts de personnel des trains souterrains sont plus faibles que ceux des bus.

La consommation d'énergie totale du tramway de Croydon (figure 20.7) en 2006–2007 (y compris le dépôt des tramways et les infrastructures à



FIGURE 20.6. Les trains ne sont pas toujours pleins. Trois hommes et un violoncelle — les seuls occupants de cette voiture du train à grande vitesse de 10h30 reliant Édimbourg à Londres.



chaque station) était de 9 kWh pour 100 p-km, avec une vitesse moyenne de 25 km/h.

Jusqu'à quel point les transports en commun pourraient-ils être intéressants ? Peut-être pouvons-nous en avoir une première indication en regardant les données qui proviennent du Japon et que montre le tableau 20.8. Avec 19 kWh pour 100 p-km et 6 kWh pour 100 p-km, bus et trains sont prometteurs. Le rail a pour lui l'avantage de résoudre nos deux objectifs à la fois — réduction de la consommation d'énergie et indépendance vis-à-vis des combustibles fossiles. Les autobus et les autocars ont comme avantages évidents leur simplicité et leur souplesse d'utilisation, mais conserver une telle simplicité et une telle souplesse, tout en faisant en sorte que les autobus et les autocars s'affranchissent de leur dépendance aux combustibles fossiles, peut s'avérer un défi ardu.

Pour résumer, les transports publics (en particulier les trains électriques, les tramways et les autobus) semblent une voie prometteuse pour le transport de passagers — ils sont économes en termes d'énergie par passager-km, peut-être cinq ou dix fois meilleurs que les voitures. Toutefois, si les gens réclament la souplesse d'un véhicule particulier, quelles autres possibilités sont à notre disposition ?

FIGURE 20.7. Quelques transports publics, et leur consommation moyenne d'énergie. A gauche : Quelques célèbres bus rouges britanniques. A droite : Le tramway de Croydon. Photos de Stephen Parascandolo.

Consommation d'énergie (kWh pour 100 p-km)	
Voiture	68
Bus	19
Rail	6
Air	51
Mer	57

TABEAU 20.8. Efficacité globale de modes de transport au Japon (1999).

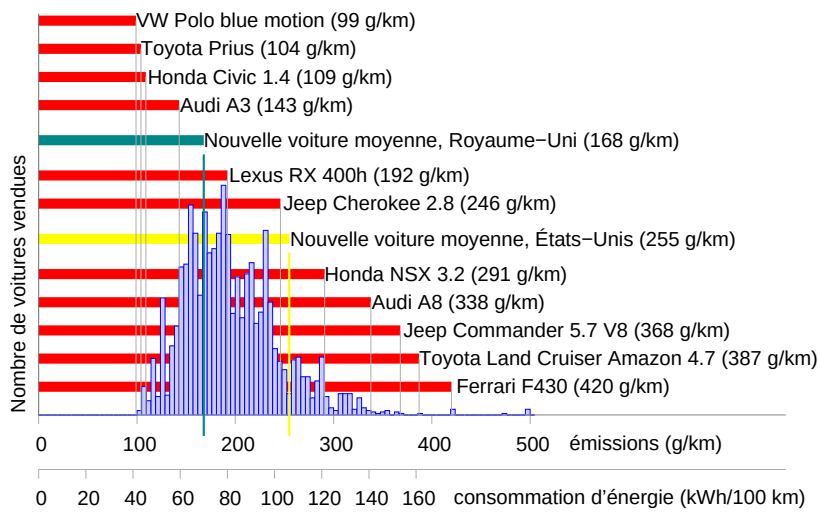


FIGURE 20.9. Pollution au carbone, en grammes de CO₂ par km, d'une sélection de voitures vendues au Royaume-Uni. L'axe horizontal représente le niveau des émissions, et la hauteur de l'histogramme bleu indique le nombre de modèles disponibles à la vente avec ce niveau d'émissions en 2006. Source : www.newcarnet.co.uk. L'échelle horizontale du bas indique les consommations d'énergie approximatives, en supposant que 240 g de CO₂ correspondent à 1 kWh d'énergie chimique.

Les véhicules particuliers : technologie, législation et incitations

Réduire la consommation d'énergie des voitures particulières, c'est possible. Le large éventail des efficacités énergétiques des voitures qui sont en vente le montre. Dans la même concession automobile en 2006, on pouvait acheter une Honda Civic 1.4 qui consomme environ 44 kWh pour 100 km, ou une Honda NSX 3.2 qui consomme 116 kWh pour 100 km (figure 20.9). Le fait que les gens achètent sans état d'âme des véhicules d'une telle diversité montre aussi qu'il nous faut plus d'incitations et de lois qui encouragent le consommateur insouciant à choisir des voitures plus économes en énergie. Il y a plusieurs façons de faire préférer la Honda Civic à la si gourmande Honda NSX 3.2 aux consommateurs : augmenter le prix du carburant ; donner un bon coup à la hausse aux taxes sur les véhicules neufs, en proportion de la consommation prévue sur l'ensemble de leur durée de vie ; donner un bon coup à la hausse aux taxes de roulage sur les véhicules gourmands ; attribuer des droits de parking particuliers aux véhicules les plus économes (figure 20.10), ou rationner le carburant. Toutes ces mesures sont impopulaires pour au moins une partie des électeurs. Une meilleure tactique législative pourrait être d'imposer une meilleure efficacité énergétique, plutôt que de continuer à laisser la possibilité d'un choix sans contrainte. Par exemple, on pourrait interdire purement et simplement, à partir d'une certaine date, la vente de toutes les voitures dont la consommation énergétique est supérieure à 80 kWh pour 100 km ; puis, après un certain temps, abaisser ce plafond à 60 kWh pour 100 km, puis 40 kWh pour 100 km, etc. Une autre voie possible est de donner plus de choix au consommateur, et d'obliger par la loi les constructeurs automobiles à réduire la consommation d'énergie moyenne de toutes les voitures qu'ils vendent. D'autres lois limitant le poids et la surface frontale des véhicules pourraient à la fois réduire la consommation de carburant et améliorer la sécurité pour les autres usagers de la route (figure 20.11). Aujourd'hui, les gens choisissent la voiture qu'ils achètent en fonction de la mode. Avec une législation forte sur l'efficacité, il pourrait encore y avoir un large choix selon la mode : simplement, tous les véhicules deviendraient économes en énergie. Vous pourriez choisir n'importe quelle couleur, pourvu que ce soit vert.

En attendant que les électeurs et les élus s'accordent pour légiférer en faveur de voitures efficaces en énergie, quelles sont les autres possibilités à notre disposition ?

Le vélo

Ma suggestion préférée est la mise en place d'excellentes infrastructures pour le vélo, accompagnée des lois appropriées (des limites de vitesse plus faibles, et des règles de priorité sur la route qui favorisent les



FIGURE 20.10. Parkings privilégiés pour les voitures électriques, à Ann Arbor (dans le Michigan, aux États-Unis).



FIGURE 20.11. Les 4x4 monstrueux sont assez volumineux pour masquer complètement la visibilité des piétons.



FIGURE 20.12. Un rond-point à Enschede, aux Pays-Bas.

cyclistes, par exemple). La figure 20.12 montre un rond-point dans la ville d'Enschede, aux Pays-Bas. Il y a deux cercles : celui pour les voitures se trouve à l'intérieur de celui pour les vélos, avec, pour les séparer, largement de quoi mettre une voiture dans sa longueur. Les règles de priorité sont les mêmes que celles d'un rond-point classique, sauf que les voitures qui quittent le rond-point central doivent laisser la priorité aux cyclistes qui traversent (exactement comme les voitures qui, en Grande-Bretagne, doivent laisser la priorité aux piétons sur les passages pour piétons). Là où les infrastructures pour les vélos sont excellentes, les gens vont les utiliser — la preuve en est, le nombre incalculable de vélos à l'extérieur de la gare d'Enschede (figure 20.13). D'une manière ou d'une autre, ce qu'offre la Grande-Bretagne pour les vélos (figure 20.14) n'est pas à la hauteur du standard hollandais.



FIGURE 20.13. Quelques vélos hollandais.



FIGURE 20.14. Pendant ce temps, en Grande-Bretagne...
Photo de droite par Mike Armstrong.

En 2005, à Lyon, a été lancé un réseau public de vélos géré par une entreprise privée, Vélo'v, qui s'est rapidement révélé populaire. La population de Lyon, de 470 000 habitants, est desservie par 2 000 vélos répartis sur 175 stations dédiées, dans une zone de 50 km² (figure 20.15). Presque partout dans le centre-ville, il y a une station à vélos à moins de 400 mètres. Les utilisateurs peuvent rejoindre le réseau en payant un droit d'entrée de 10 € par an, et ils peuvent ensuite emprunter des vélos gratuitement pour n'importe quel trajet de moins de 30 minutes. Pour les périodes de locations plus longues, les usagers paient jusqu'à 1 € par heure. Et les visiteurs de passage à Lyon peuvent acheter des abonnements d'une semaine pour 1 €.



FIGURE 20.15. Une station Vélo'v à Lyon.

Autres possibilités législatives

Les limitations de vitesse sont un levier simple avec lequel on peut jouer. En règle générale, les voitures qui vont moins vite consomment moins d'énergie (cf. chapitre technique A). Avec de la pratique, les conducteurs peuvent apprendre à conduire de façon plus économe : moins utiliser l'accélérateur et le frein, et toujours conduire sur le rapport le plus élevé possible permet d'atteindre une baisse de sa consommation de carburant de 20 %.

Une autre manière de réduire la consommation de carburant est de réduire les embouteillages. S'arrêter et redémarrer, accélérer et ralentir est beaucoup moins efficace pour circuler que de conduire sans à-coups. Le nombre de litres consommés aux 100 kilomètres est particulièrement élevé quand on passe son temps bloqué dans un bouchon !

Des embouteillages apparaissent lorsqu'il y a trop de véhicules sur les routes. Une manière simple de réduire les encombrements est donc de regrouper les voyageurs dans moins de véhicules. Une manière frappante pour réfléchir à un basculement possible de la voiture au bus est de calculer la surface de route qui est nécessaire à chacun de ces deux modes de transport. Prenez une route nationale proche de la saturation, où la vitesse souhaitée est de 90 km/h. A cette vitesse, la distance de sécurité entre les voitures est de 72 mètres. Si nous supposons qu'il y a une voiture tous les 80 mètres, et que chaque voiture contient en moyenne 1,6 personnes, alors vider 40 personnes dans un seul autocar libère deux kilomètres de route !

On peut également réduire les embouteillages en proposant des alternatives sérieuses (pistes cyclables, transports publics) et en faisant payer plus cher les utilisateurs de la route s'ils contribuent aux embouteillages. Dans les notes de fin de ce chapitre, je décris une méthode simple et équitable pour gérer cette participation financière aux embouteillages.



FIGURE 20.16. Avec des embouteillages comme celui-là, il est encore plus rapide de marcher.

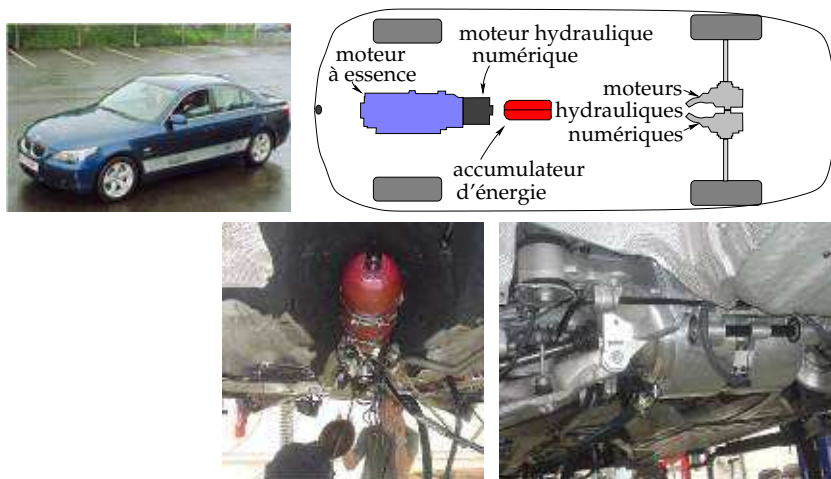


FIGURE 20.17. Une BMW 530i modifiée par Artemis Intelligent Power pour utiliser un système hydraulique contrôlé par ordinateur. En bas à gauche : un accumulateur de 6 litres (la bouteille rouge), capable de stocker environ 0,05 kWh d'énergie sous forme d'azote comprimé. En bas à droite : deux moteurs hydrauliques de 200 kWh, un pour chaque roue arrière, capables aussi bien d'accélérer que de ralentir la voiture. La voiture est toujours mue par son moteur à essence standard de 190 kW, mais grâce à la transmission hydraulique contrôlée par ordinateur et la récupération d'énergie au freinage, elle consomme 30 % de carburant de moins.

Améliorer les voitures

En supposant que cette histoire d'amour entre le monde développé et la voiture ne soit pas près de s'achever, quelles sont les technologies susceptibles d'apporter des économies d'énergie importantes ? Gagner 10 % ou 20 %, c'est facile — nous avons déjà parlé de diverses manières de les atteindre, comme faire des voitures plus petites et plus légères. Une autre possibilité est de passer de l'essence au gazole. Les moteurs Diesel sont plus chers à fabriquer, mais ils ont tendance à être plus économes en carburant. Mais y a-t-il des technologies capables d'améliorer radicalement l'efficacité de la chaîne de conversion d'énergie ? (Rappelez-vous que dans une voiture à essence classique, 75 % de l'énergie sont transformés en chaleur et évacués par le radiateur !). Et que dire de notre objectif de nous débarrasser des combustibles fossiles ?

Dans cette section, nous allons parler de cinq technologies : la récupération d'énergie au freinage, les voitures hybrides, les voitures électriques, les voitures à hydrogène et les voitures à air comprimé.

La récupération d'énergie au freinage

Il y a quatre manières pour récupérer l'énergie lorsqu'un véhicule ralentit :

1. Un générateur électrique couplé aux roues peut charger une batterie électrique ou un supercondensateur.
2. Des moteurs hydrauliques mus par les roues peuvent comprimer de l'air, puis le stocker dans un petit réservoir.
3. L'énergie peut être stockée dans un volant d'inertie.
4. L'énergie récupérée du freinage peut être stockée sous forme d'énergie potentielle, en faisant monter le long d'une rampe à chaque fois

qu'il ralentit. Cette possibilité de stockage par énergie potentielle n'a que très peu de souplesse, car il faut une telle rampe au bon endroit lorsque le véhicule freine. Par contre, elle est très utile pour les trains, et elle a été mise en pratique sur la ligne Victoria du métro de Londres, qui possède des stations en dos d'âne. Chaque station de la ligne se trouve au sommet d'une butte. Les trains à l'arrivée sont automatiquement ralentis par la montée de la butte, et ceux qui partent sont accélérés lorsqu'ils redescendent pour quitter la station. La conception des stations en dos d'âne permet une économie d'énergie de 5 % et un gain en vitesse de 9 %.

Lorsqu'elle repose sur une batterie pour stocker l'énergie, la récupération d'énergie au freinage préserve environ 50 % de l'énergie de la voiture dissipée lors du freinage, ce qui permet sans doute de réduire d'environ 20 % le coût énergétique de la conduite en ville.

Les systèmes de récupération d'énergie qui reposent sur des volants d'inertie et de l'hydraulique semblent fonctionner un peu mieux que les systèmes à batteries, préservant au moins 70 % de l'énergie du freinage. La figure 20.17 décrit une voiture hybride avec un moteur à essence qui alimente des moteurs hydrauliques contrôlés par ordinateur. Sur un cycle de conduite standard, cette voiture consomme 30 % de carburant en moins que la voiture à essence d'origine. En conduite urbaine, sa consommation d'énergie est réduite de moitié, passant de **131 kWh pour 100 km** à **62 kWh pour 100 km** (de 14 L/100 km à 6,5 L/100 km). (Le mérite de cette amélioration de performance doit être partagé entre la récupération d'énergie au freinage et l'utilisation d'une technologie hybride). L'hydraulique et les volants d'inertie sont deux voies prometteuses pour gérer la récupération d'énergie au freinage, car il s'agit de systèmes de petite taille capables de gérer de fortes puissances. Un système à volant d'inertie pesant seulement 24 kg (figure 20.18), conçu pour le stockage d'énergie dans une voiture de course, peut stocker 400 kJ (0,1 kWh) d'énergie — suffisamment pour accélérer une voiture ordinaire jusqu'à 100 km/h, et il peut absorber ou fournir 60 kW de puissance. Pour être capables de fournir une telle puissance, il faudrait que les batteries électriques pèsent dans les 200 kg. Donc à moins que vous ne transportiez déjà toutes ces batteries dans votre véhicule, un système de récupération d'énergie au freinage devra probablement utiliser des condensateurs pour stocker cette énergie. Les supercondensateurs ont des paramètres de stockage d'énergie et de restitution de puissance comparables à ceux des volants d'inertie.

Les voitures hybrides

Les voitures hybrides comme la Toyota Prius (figure 20.19) ont un moteur et des systèmes de récupération d'énergie au freinage plus efficaces. Mais pour être honnête, les véhicules hybrides actuels ne sortent guère du lot (figure 20.9).



FIGURE 20.18. Un système de stockage d'énergie récupérée du freinage par volant d'inertie. Photos gracieusement fournies par « Flybrid Systems ».



FIGURE 20.19. Une Toyota Prius — selon Jeremy Clarkson, « un moyen de se déplacer très cher, très complexe, pas très vert, lent, construit à moindre coût, et absurde ».

Les lignes horizontales de la figure 20.9 permettent de comparer quelques voitures, dont deux hybrides. Alors qu'en moyenne, les voitures neuves au Royaume-Uni émettent 168 g de CO₂, la Prius hybride émet environ 100 g de CO₂ par km, comme le font plusieurs autres véhicules non-hybrides — la Volkswagen Polo BlueMotion émet 99 g/km de CO₂, et il y a même une Smart qui émet seulement 88 g/km de CO₂.

La Lexus RX 400h est la seconde voiture hybride,, dont la publicité outre-Manche a été faite avec le slogan « FAIBLES ÉMISSIONS, ZÉRO CULPABILITÉ ». Mais elle émet 192 g de CO₂ au kilomètre — c'est plus que la voiture moyenne au Royaume-Uni ! L'autorité de contrôle de la publicité a estimé que cette publicité violait le code de bonne conduite en matière de véracité, de comparaison et de revendication environnementale. « Nous avons considéré que [...] les lecteurs comprendraient vraisemblablement que la voiture n'est que peu ou pas une cause de dégradation de l'environnement, ce qui n'était pas le cas ; et que la voiture avait de faibles émissions comparées à celles des autres voitures, ce qui n'était pas non plus le cas. »

En pratique, les technologies hybrides semblent permettre des économies d'énergie de 20 ou 30 %. Donc ni ces hybrides essence-électrique, ni les hybrides essence-hydraulique présentés par la figure 20.17 ne semblent avoir vraiment entamé le défi du transport. Une réduction de 30 % de la consommation de combustibles fossiles, c'est impressionnant, mais au regard des objectifs de ce livre, ça n'est pas suffisant. Notre hypothèse de départ était que nous voulions nous débarrasser de la dépendance aux combustibles fossiles, ou du moins en réduire l'usage de 90 %. Peut-on atteindre ce but sans en revenir au vélo ?



FIGURE 20.20. Voitures électriques. De gauche à droite : la G-Wiz, la carcasse rouillée d'une Sinclair C5, une Citroën Berlingo, et une Elettrica.

Les véhicules électriques

La voiture électrique REVA a été lancée en juin 2001 à Bangalore en Inde, et elle a été exportée au Royaume-Uni sous le nom de G-Wiz. Le moteur électrique de la G-Wiz a une puissance-crête de 13 kW, et elle peut produire une puissance en continu de 4,8 kW. Le moteur récupère l'énergie au freinage. Il est alimenté par huit batteries acide-plomb de 6 volts qui, à pleine charge, offrent une autonomie « jusqu'à 77 kilomètres ». Une pleine

charge consomme 9,7 kWh d'électricité. Ces chiffres impliquent un coût de transport de 13 kWh pour 100 km.

Les fabricants citent toujours la meilleure performance possible de leurs produits. Mais qu'en est-il dans la vraie vie? La figure 20.21 montre la performance réelle d'une G-Wiz à Londres. Après 19 recharges, le coût moyen du transport de cette G-Wiz aura été de **21 kWh pour 100 km** — soit environ quatre fois moins qu'une voiture moyenne à combustibles fossiles. Le meilleur résultat a été de 16 kWh pour 100 km, et le pire de 33 kWh pour 100 km. Si le sujet des émissions de carbone vous intéresse, sachez que 21 kWh pour 100 km sont équivalents, en Grande-Bretagne, à 105 g de CO₂ par km, en supposant que l'électricité a une empreinte carbone de 500 g de CO₂ par kWh.

Cependant, la G-Wiz se situe à l'extrémité basse de l'échelle des performances. Et si nous voulions plus — plus d'accélération, plus de vitesse, plus d'autonomie? À l'autre extrémité de l'échelle, se trouve la Tesla Roadster. La Tesla Roadster de 2008 a une autonomie de 350 km; ses batteries lithium-ion stockent 53 kWh et pèsent 450 kg (soit un rapport énergie/masse de 120 Wh/kg). Le véhicule pèse 1 220 kg et la puissance maximale de son moteur est de 185 kW. Quelle est la consommation d'énergie de cette voiture tout en muscles? Fait remarquable, elle est inférieure à celle de la G-Wiz : **15 kWh pour 100 km**. Une autonomie de 350 km devrait être suffisante pour la plupart des gens, la plupart du temps : la preuve en est que seulement 8,3 % des gens font plus de 30 km pour aller travailler.

J'ai repris les chiffres de performance de nombre de véhicules électriques — ils sont listés dans les notes de fin de ce chapitre — et ils semblent confirmer que les véhicules électriques peuvent fournir un transport à un coût énergétique d'environ **15 kWh pour 100 km**. C'est cinq fois mieux que notre voiture à essence de départ, et significativement mieux que n'importe quelle voiture hybride. Hourra! Pour atteindre un transport économe, nous ne sommes plus obligés de nous entasser dans les transports publics — on peut encore s'égayer, jouir de tous les plaisirs et libertés de voyager en solo, grâce aux véhicules électriques.

Cet instant de fête paraît idéal pour dévoiler le grand diagramme qui va résumer ce chapitre, la figure 20.23. Cette figure montre les besoins en énergie de toutes les formes de transport de passagers dont nous avons parlé, et de quelques unes encore à venir.

OK, maintenant, la course est finie, et j'ai déjà annoncé deux vainqueurs — les transports publics et les véhicules électriques. Mais y a-t-il d'autres possibilités susceptibles de passer en tête la ligne d'arrivée? La voiture à air comprimé, la voiture à hydrogène, qui n'en a pas entendu parler? Nous allons en prendre quelques nouvelles. Si l'une ou l'autre s'avère meilleure que la voiture électrique, cela ne changera pas beaucoup les perspectives à long terme : quelle que soit celle de ces trois technologies que nous choisirons, les véhicules devront être rechargés avec de l'énergie obtenue

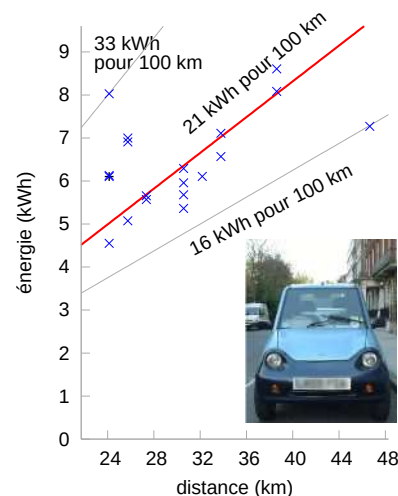


FIGURE 20.21. Quantité d'électricité nécessaire pour recharger une G-Wiz, en fonction de la distance parcourue. Les mesures ont été faites à la prise électrique.



FIGURE 20.22. La Tesla Roadster : **15 kWh pour 100 km**.
www.teslamotors.com.

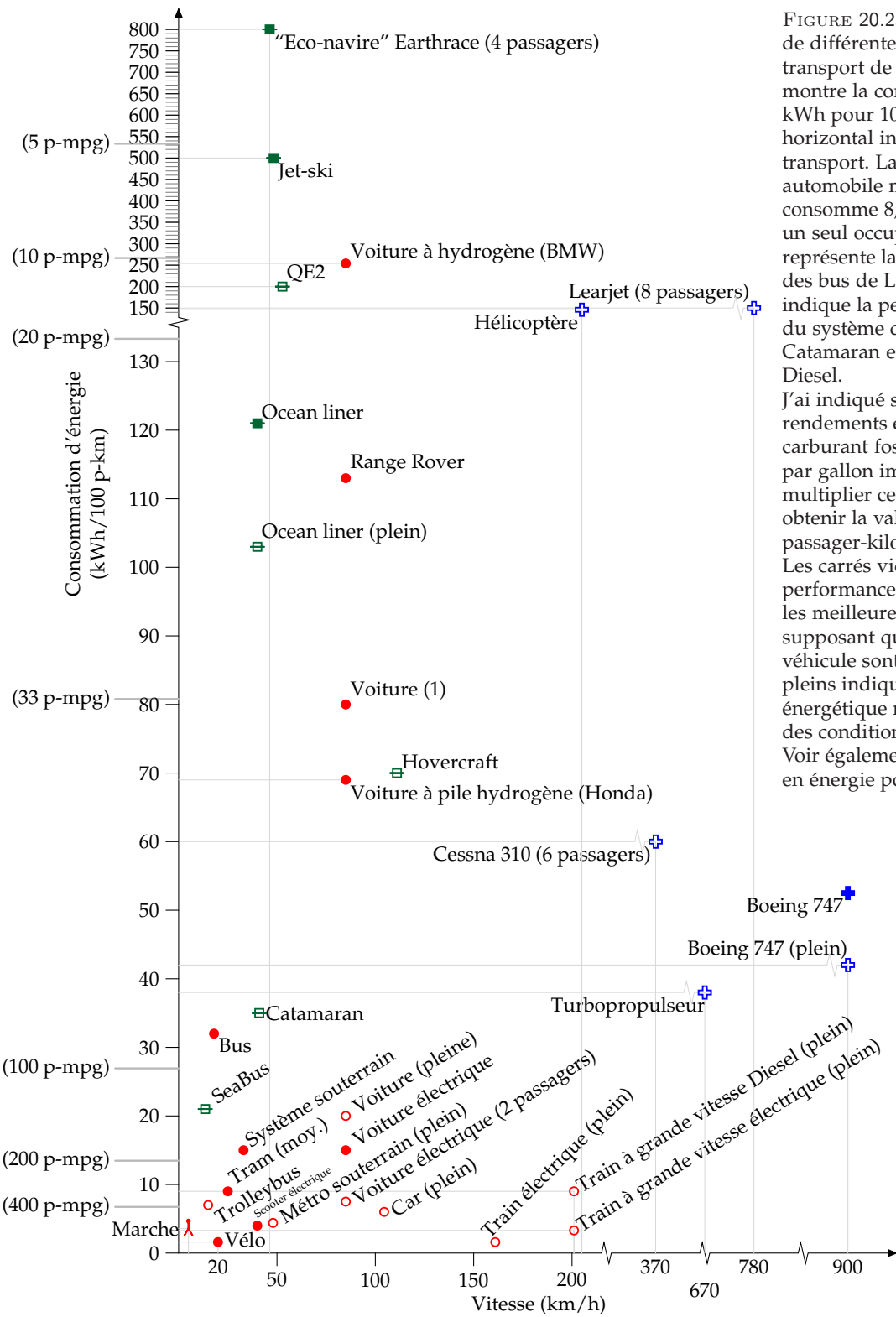


FIGURE 20.23. Besoins en énergie de différentes formes de transport de passagers. L'axe vertical montre la consommation d'énergie en kWh pour 100 passagers-km. L'axe horizontal indique la vitesse du transport. La « Voiture (1) » est une automobile moyenne britannique qui consomme 8,5 litres pour 100 km avec un seul occupant. Le « Bus » représente la performance moyenne des bus de Londres. Le « Métro » indique la performance de l'ensemble du système du métro londonien. Le Catamaran est un bateau à moteur Diesel. J'ai indiqué sur l'échelle de gauche les rendements équivalents avec un carburant fossile, en passagers-milles par gallon impérial (p-mpg). Il faut multiplier ces chiffres par 3 pour obtenir la valeur en passager-kilomètre par litre (p-km/L). Les carrés vides indiquent la performance obtenue en appliquant les meilleures pratiques, et en supposant que toutes les places du véhicule sont utilisées. Les carrés pleins indiquent la performance énergétique réelle d'un véhicule dans des conditions d'utilisation typique. Voir également la figure 15.8 (besoins en énergie pour le transport de fret).

à partir d'une source « verte ».

La voiture à air comprimé

Les véhicules à air comprimé ne sont pas une idée nouvelle. Des centaines de tramways mus par de l'air comprimé et de l'eau chaude parcouraient sans relâche les rues de Nantes et de Paris entre 1879 et 1911. La figure 20.24 montre une locomotive pneumatique allemande de 1958. A mon avis, en termes d'efficacité énergétique, la technique de l'air comprimé pour stocker de l'énergie n'est pas aussi bonne que celle de la batterie électrique. Le problème est que comprimer de l'air génère de la *chaleur* qui est peu susceptible d'être utilisée de manière efficace là où elle est produite; et détendre l'air comprimé produit du *froid*, un autre sous-produit qui a le même inconvénient. Mais l'air comprimé peut être une technologie supérieure aux batteries électriques sur d'autres plans. Par exemple, l'air peut être comprimé des milliers de fois et ne s'use pas! Il est intéressant de noter, cependant, que le premier produit commercialisé par la société Aircar (connue aussi sous le sigle MDI) est en fait un scooter... *électrique*. [www.theaircar.com/acf]

Des discussions ont lieu à Tata Motors, en Inde, au sujet de la fabrication de voitures à air comprimé, mais il est difficile de savoir si les véhicules à air comprimé vont connaître une renaissance, car personne n'a encore publié de spécification décrivant un prototype moderne. La limitation fondamentale est la suivante : l'énergie massique (c'est-à-dire la quantité d'énergie par kg) des systèmes de stockage d'air comprimé est d'environ 11 à 28 Wh par kg, ce qui est similaire à celle des batteries acide-plomb, et environ cinq fois moins que les batteries lithium-ion. (La figure 26.13, en page 235, donne des détails sur d'autres technologies de stockage.) Donc l'autonomie d'une voiture à air comprimé ne sera jamais supérieure à celle des toutes premières voitures électriques. Cependant, les systèmes de stockage d'air comprimé présentent trois avantages par rapport aux batteries : une plus longue durée de vie, une fabrication moins chère et l'utilisation de moins de produits chimiques nocifs.

La voiture à hydrogène — votre moteur va gazer

A mon avis, cette histoire d'hydrogène a été montée en mayonnaise. Je serais ravi qu'on me prouve que j'ai tort, mais je ne vois pas comment l'hydrogène va pouvoir nous aider à résoudre nos problèmes énergétiques. L'hydrogène n'est pas une *source* miraculeuse d'énergie, c'est juste un *vecteur* d'énergie, comme l'est une batterie rechargeable. Et pour transporter de l'énergie, c'est un vecteur plutôt inefficace, avec, concrètement, tout un tas de défauts pratiques.

« L'économie de l'hydrogène » a reçu le soutien du magazine *Nature*, dans un article qui faisait l'éloge du gouverneur de Californie, Arnold



FIGURE 20.24. En haut : un tramway à air comprimé embarquant de l'air et de la vapeur à Nantes. Alimenter les tramways de Nantes consommait 4,4 kg de charbon (36 kWh) par véhicule-km, soit 115 kWh pour 100 p-km si les tramways étaient complets. [5qhvcb] En bas : Une locomotive à air comprimé; poids : 9,2 tonnes; pression : 175 bars; puissance : 26 kW. Photo gracieusement fournie par Rüdiger Fach, Rolf-Dieter Reichert, et le Frankfurter Feldbahnmuseum.



FIGURE 20.25. Le Hummer H2H : La révolution verte à l'américaine. Photo gracieusement fournie par General Motors.

Schwarzenegger, remplissant le réservoir d'un Hummer fonctionnant à l'hydrogène (figure 20.25). L'article de Nature glorifiait la vision d'Arnold au sujet des voitures à hydrogène capables de remplacer les « modèles polluants » avec la phrase-choc « le gouverneur, un "action hero" du climat au quotidien ». Mais la question fondamentale qui doit être posée lorsqu'un tel héroïsme hydrogénique est affiché est la suivante : « où est l'énergie qu'il a fallu apporter pour fabriquer l'hydrogène ? » De plus, convertir l'énergie vers, puis à partir de l'hydrogène ne peut être fait que de manière inefficace — du moins, avec les technologies actuelles.

Voici quelques chiffres :

- Dans le projet CUTE (*Clean Urban Transport for Europe*), qui visait à démontrer la faisabilité et la fiabilité des autobus utilisant la technologie de la pile à combustible et de l'hydrogène, ravitailler en combustible les autobus requerrait entre 80 % et 200 % d'énergie *en plus* que les bus à moteur Diesel de référence.
- Alimenter une *Hydrogen 7*, la voiture à hydrogène construite par BMW, requiert **254 kWh pour 100 km** — c'est-à-dire 220 % d'énergie *en plus* qu'une voiture européenne moyenne.

Si notre tâche était juste de dire « veuillez cesser d'utiliser des combustibles fossiles pour le transport, vous pouvez compter sur l'idée que des quantités *infinies* d'électricité verte sont disponibles gratuitement », alors oui, bien sûr, une solution de transport à ce point prodigue en énergie comme l'hydrogène pourrait prétendre être une réponse possible (bien que l'hydrogène présente d'autres problèmes). Mais *l'électricité verte n'est pas gratuite*. Car en effet, obtenir de l'électricité verte dans des quantités à la hauteur de notre consommation actuelle va être un sacré défi. Le sujet des combustibles fossiles va être aussi un sacré défi énergétique. Le problème du changement climatique va être aussi un sacré défi énergétique. Il va falloir nous concentrer sur des solutions qui consomment moins d'énergie, pas sur des « solutions » qui en consomment plus ! Or *je ne connais aucune forme de transport terrestre qui consomme plus d'énergie que cette voiture à hydrogène*. (A ma connaissance, les seuls moyens de transport qui soient pires, ce sont les jet-skis — qui consomment **500 kWh pour 100 km** — et le bateau à grande vitesse *Earthrace* dont le moteur brûle du biodiesel, et dont le nom, « éco-bateau », est totalement absurde, puisqu'il consomme **800 kWh pour 100 p-km**.)

Certains partisans de l'hydrogène rétorqueront que « la BMW Hydrogen 7 n'est qu'un premier prototype, et c'est une voiture de luxe avec beaucoup de muscles — la technologie va devenir plus efficace ». Eh bien, je l'espère, parce qu'il y a encore un sacré boulot. La Tesla Roadster (figure 20.22) est aussi un premier prototype, et c'est aussi une voiture de luxe avec beaucoup de muscles. Et elle est plus de dix fois plus économe en énergie que l'Hydrogen 7 ! Vous êtes libre de parier sur le cheval à hydrogène si vous voulez, et s'il gagne à la fin, tant mieux. Mais parier sur un cheval qui se trouve si loin derrière dans la course semble vraiment stupide. Il suffit de



FIGURE 20.26. BMW Hydrogen 7. Consommation d'énergie : **254 kWh pour 100 km**. Photo de BMW.



FIGURE 20.27. Le mal nommé « éco-bateau » EarthRace. Photo par David Castor.

regarder la figure 20.23 — si je n'avais pas écrasé le haut de l'axe vertical, la voiture à hydrogène ne serait même pas entrée dans la page !

Alors c'est vrai, la voiture à pile à combustible Honda, la FCX Clarity, fait mieux — elle se contente de « seulement » **69 kWh pour 100 km** — mais je vous prédis qu'une fois que tous ceux qui claironnent du « zéro-émission » à qui mieux mieux se seront tus, on réalisera que les voitures à hydrogène ne consomment pas moins d'énergie que la voiture moyenne à essence d'aujourd'hui.

L'hydrogène pose également d'autres problèmes. Les voici. L'hydrogène est un support de stockage de l'énergie moins commode que la plupart des carburants liquides, à cause du volume qu'il occupe, que ce soit sous forme de gaz comprimé ou de liquide (ce qui oblige à le maintenir à une température de -253°C). Même comprimé à une pression de 700 bars (ce qui oblige à utiliser un récipient pressurisé sévèrement costaud), sa densité énergétique (c'est-à-dire son énergie par unité de volume) est 22 % celle de l'essence (presque cinq fois plus faible). Le réservoir cryogénique de la BMW Hydrogen 7 pèse 120 kg et stocke 8 kg d'hydrogène. De plus, l'hydrogène s'échappe peu à peu de n'importe quel récipient, aussi fermé soit-il. Si vous gardez votre voiture à hydrogène près d'une gare de train et que vous revenez une semaine plus tard, il faut vous attendre à ce que l'essentiel de l'hydrogène du réservoir ait disparu.

Quelques interrogations sur les véhicules électriques

Vous avez montré que les voitures électriques étaient plus efficaces sur le plan énergétique que les voitures consommant des carburants fossiles. Mais sont-elles meilleures si notre objectif est de réduire les émissions de CO₂, alors que l'électricité est toujours produite par des centrales thermiques qui brûlent des combustibles fossiles ?

C'est un calcul très facile à faire. Supposons que le coût énergétique du véhicule électrique soit de 20 kWh(e) pour 100 km. (A mon avis, 15 kWh(e) pour 100 km seraient parfaitement possibles, mais jouons un peu aux sceptiques pour ce petit calcul.) Si le réseau électrique a une empreinte carbone de 500 g par kWh(e), alors les émissions réelles de ce véhicule sont de **100 g de CO₂ par km**, ce qui est équivalent aux meilleures voitures qui brûlent directement des combustibles fossiles (figure 20.9). J'en conclus donc que passer aux voitures électriques est *déjà* une bonne idée, avant même que l'on verdisse notre approvisionnement en électricité.

Les voitures électriques, comme les voitures à combustibles fossiles, ont toutes des coûts de fabrication et d'utilisation. Les voitures électriques sont peut-être moins chères à l'usage, mais si les batteries ne durent pas longtemps, ne devriez-vous pas accorder plus d'attention aux coûts de fabrication ?

Oui, c'est une bonne remarque. Mon diagramme de transport ne montre que le coût d'utilisation. Si les voitures électriques ont besoin de nouvelles



FIGURE 20.28. La Honda FCX Clarity, berline à pile à combustible à hydrogène, avec Jamie Lee Curtis pour l'échelle. Photo gracieusement fournie par automobiles.honda.com.

batteries après quelques années, mes chiffres peuvent être sous-estimés. Les batteries dans une Prius sont prévues pour durer 10 ans seulement, et un nouveau jeu de batteries coûterait 5 000 €. Quel propriétaire d'une Prius vieille de 10 ans accepterait de supporter ce coût ? On peut s'attendre à ce que la plupart des Prius soient mises à la poubelle dès l'âge de 10 ans. C'est certainement un sujet d'inquiétude pour tous les véhicules électriques utilisant des batteries. J'imagine que je suis optimiste en croyant que, lorsque nous passerons aux véhicules électriques, la technologie des batteries progressera sur ce point.

Je vis dans un pays chaud. Comment est-ce que je pourrais utiliser une voiture électrique ? J'ai besoin de la climatisation, même si c'est énergivore !

Il y a une solution élégante à une telle demande : posez 4 m² de panneaux photovoltaïques sur les faces horizontales de la voiture électrique qui sont orientées vers le haut. S'il y a besoin de la climatisation, c'est que le soleil doit sûrement briller. Des panneaux avec un rendement de 20 % permettront de générer jusqu'à 800 W, ce qui suffit pour alimenter la climatisation d'une voiture. Les panneaux pourraient même apporter une contribution utile à la recharge des batteries de la voiture quand elle est garée. Une climatisation à énergie solaire a été incluse dans une Mazda en 1993 ; les cellules photovoltaïques étaient intégrées dans le toit ouvrant vitré.

Je vis dans un endroit froid. Comment est-ce que je pourrais utiliser une voiture électrique ? J'ai besoin du chauffage, même si c'est énergivore !

Le moteur d'un véhicule électrique, quand il est en marche, consomme en moyenne quelque chose comme 10 kW, avec un rendement de 90 à 95 %. Une partie de cette puissance perdue, c'est-à-dire les 5 à 10 % restants, sont dissipés sous forme de chaleur par le moteur. Il doit être possible de concevoir des voitures électriques de façon à ce que la chaleur dissipée par le moteur, équivalant à entre 250 et 500 W, puisse être redirigée vers l'habitacle de la voiture. Cette chaleur pourrait fournir de quoi désembuer le pare-brise et réchauffer les occupants.

Les batteries lithium-ion sont-elles sûres en cas d'accident ?

Certaines batteries lithium-ion sont dangereuses en cas de court-circuit ou de surchauffe, mais l'industrie des batteries produit désormais des batteries plus sûres, comme celles au lithium-phosphate. On peut voir une vidéo amusante sur la sécurité des batteries sur www.valence.com.

Y a-t-il assez de lithium disponible pour fabriquer les batteries d'une immense flotte de véhicules électriques ?

Les réserves mondiales de lithium sont estimées à 9,5 millions de tonnes dans des dépôts de minerais (page 208). Une batterie lithium-ion contient

3 % de lithium. Si on suppose que chaque véhicule possède une batterie de 200 kg, alors il nous faut 6 kg de lithium par véhicule. Les réserves estimées dans les dépôts de minerais sont donc suffisantes pour fabriquer les batteries de 1,6 milliard de véhicules. C'est plus que le nombre de véhicules dans le monde aujourd'hui (environ 1 milliard) — mais pas beaucoup plus, donc la quantité de lithium peut être un sujet d'inquiétude, surtout quand on prend en compte les ambitions contradictoires de la petite troupe de la fusion nucléaire (chapitre 24) qui voudraient engloutir du lithium dans leurs réacteurs. Or il y a des milliers de fois plus de lithium dans l'eau de mer ; les océans constitueront donc peut-être une ressource de secours utile. Cependant, selon le spécialiste du lithium R. Keith Evans, « les inquiétudes au sujet de la disponibilité du lithium pour fabriquer les batteries de véhicules hybrides ou électriques, ou d'autres applications prévisibles, sont infondées ». Et de toute façon, d'autres technologies de batteries sans lithium, comme les batteries zinc-air, sont en cours de mise au point [www.revolttechnology.com]. A mon avis, la voiture électrique est un bon plan !

L'avenir de l'avion ?

Airbus dit de son très gros porteur A380 qu'il est « un avion très économe en carburant ». En fait, il brûle seulement 12 % de moins de carburant par passager qu'un 747.

Boeing a annoncé des percées similaires : son nouveau 747-8 Intercontinental, dont on a claironné les qualités de sauveur de l'environnement, est (selon les annonces de Boeing) seulement 15 % plus économe en carburant qu'un 747-400.

Cette lenteur des progrès (qui contraste avec les progrès faits sur les voitures, pour lesquelles les changements technologiques apportent des améliorations d'un facteur deux, voire dix d'efficacité énergétique) est expliqué dans le chapitre technique C. Les avions se cognent contre un plafond dû à une limite fondamentale imposée par les lois de la physique. Tout avion, quelle que soit sa taille, *doit* dépenser une quantité d'énergie de l'ordre de 0,4 kWh par tonne-km pour rester en l'air sans tomber et pour maintenir sa vitesse. Les avions ont déjà été extrêmement optimisés, et il n'y a plus d'espoir de trouver de nouvelles améliorations significatives dans l'efficacité des avions.

J'ai longtemps cru que la façon de résoudre ce problème du transport longue distance était de revenir à la manière qu'on employait avant les avions : les paquebots. Et puis j'ai regardé les chiffres. La triste vérité, c'est que les paquebots consomment plus d'énergie par passager-kilomètre que les avions gros porteurs. Le Queen Elizabeth II consomme quatre fois plus d'énergie par passager-km qu'un avion gros porteur. D'accord, c'est un navire de luxe. Peut-on faire mieux avec des paquebots plus lents avec des classes touriste ? Entre 1952 et 1968, la manière la plus économique pour



FIGURE 20.29. Un Airbus A380.



FIGURE 20.30. Le TSS Rijndam.

traverser l'Atlantique était d'emprunter l'un des deux navires construits par les Pays-Bas, qu'on appelait les « Jumeaux Économiques », le Maasdam et le Rijndam. Ils croisaient à une vitesse de 16,5 nœuds (30,5 km/h) : la traversée de la Grande-Bretagne à New-York prenait huit jours. Leur consommation d'énergie, lorsqu'ils étaient pleins avec 893 passagers, était de 103 kWh pour 100 p-km. Avec un taux de remplissage typique de 85 %, leur consommation d'énergie était de **121 kWh pour 100 p-km** — plus de deux fois celle d'un avion gros porteur. Pour être honnête vis-à-vis des bateaux, ils ne font pas que fournir du transport : ils fournissent également aux passagers et membres d'équipage du chauffage, de l'eau chaude, de la lumière et des divertissements pour plusieurs jours ; mais l'énergie économisée en restant enfermé sur le bateau est éclipsée par la consommation d'énergie du bateau, qui, dans le cas du Queen Elizabeth II, est d'environ 3 000 kWh par jour et par passager.

Hélas, je crains fort, donc, que les bateaux ne puissent jamais battre les avions en matière de consommation d'énergie. Si, en fin de compte, on veut malgré tout pouvoir voyager sur de longues distances sans utiliser de combustibles fossiles, peut-être les navires à propulsion nucléaire sont-ils une possibilité intéressante (figures 20.31 et 20.32).

Qu'en est-il du fret ?

Aussi surprenant que cela puisse paraître, le transport maritime international est un consommateur de combustibles fossiles très efficace en énergie. Du transport par route ou par porte-conteneurs, c'est donc le premier qui devrait prioritairement se débarrasser des combustibles fossiles. Mais les combustibles fossiles sont une ressource limitée, et les bateaux devront bien un jour être alimentés par autre chose. Les biocarburants *pourraient* être une solution possible. Une autre possibilité pourrait être l'énergie nucléaire. Le premier navire à propulsion nucléaire pour le transport de marchandises et de passagers a été le NS Savannah, lancé en 1962 dans le cadre de l'initiative du président Eisenhower « *Atoms for Peace* » (figure 20.31). Mû par un réacteur nucléaire de 74 MW couplé à un moteur de 15 MW, le Savannah avait une vitesse de croisière de 21 nœuds (39 km/h), et pouvait transporter 60 passagers et 14 000 tonnes de fret. Cela représente un coût de transport de marchandises de 0,14 kWh par tonne-km. Il pouvait parcourir 500 000 km sans ravitaillement. Il existe déjà de nombreux navires à propulsion nucléaire, tant militaires que civils. Par exemple, la Russie possède dix navires brise-glace à propulsion nucléaire, dont sept sont toujours en activité. La figure 20.32 montre le brise-glace à propulsion nucléaire Yamal, qui possède deux réacteurs de 171 MW, et dont les moteurs peuvent développer 55 MW.



FIGURE 20.31. Le NS Savannah, le premier navire commercial de transport de fret à propulsion nucléaire, passant sous le pont du Golden Gate en 1962.



FIGURE 20.32. Le brise-glace à propulsion nucléaire Yamal, avec à son bord 100 touristes, et se dirigeant vers le pôle Nord, en 2001. Photo par Wofratz.

« Attendez ! Vous n’avez pas parlé de la sustentation magnétique ! »

La société allemande Transrapid, qui a construit le train à sustentation magnétique appelé Maglev pour Shanghai, en Chine (figure 20.33) déclare que « le système Superspeed Maglev de Transrapid est sans équivalent dans le monde pour le niveau de bruit, la consommation d’énergie, et l’occupation au sol. Ce système de transport novateur sans contact au sol offre la mobilité sans perturber l’environnement ».

La sustentation magnétique est l’une de ces nombreuses technologies qui excitent beaucoup les gens quand il s’agit de parler des problèmes énergétiques. En fait, en termes de consommation d’énergie, la comparaison avec d’autres trains à grande vitesse n’est pas si flatteuse que ce que le battage médiatique pourrait laisser penser. Le site Internet de Transrapid compare son train avec l’InterCity-Express (ICE), un train électrique à grande vitesse allemand.

Comparaison des trains à grande vitesse à 200 km/h	
Transrapid	2,2 kWh pour 100 places-kilomètres
ICE	2,9 kWh pour 100 places-kilomètres

Les principales raisons pour lesquelles le « Maglev » est légèrement meilleur que l’ICE sont les suivantes : le moteur à propulsion magnétique a un rendement élevé, le train lui-même a une faible masse, car l’essentiel du système de propulsion se trouve dans le rail plutôt que dans le train, et il y a plus de passagers dans le train pour un même volume, parce que l’espace nécessaire aux moteurs a été libéré. Oh, et puis aussi parce que les données proviennent du site Web de la société qui fabrique le Maglev, donc il faut bien que le Maglev paraisse meilleur !

Soit dit en passant, les gens qui l’ont vu à Shanghai me disent qu’à pleine vitesse, le train ransrapid est « à peu près aussi silencieux qu’un avion à réaction ».

Notes et bibliographie

Page n°

141 *Il y a une statistique souvent citée qui dit entre les lignes que « seulement 1 pour cent de l’énergie utilisée par une voiture sert à déplacer son conducteur »* En fait, le pourcentage précisé dans ce mythe n’est pas toujours le même. Certains prétendent que « 5 % de l’énergie sert au déplacement du conducteur. » D’autres affirment que « à peine 0,3 % de l’énergie du carburant sert à déplacer le conducteur. » [4qgg8q] Mon point de vue est qu’aucune de ces statistiques n’est correcte, ni même utile pour comprendre quoi que ce soit.



FIGURE 20.33. Un train Maglev à sustentation magnétique à l’aéroport international de Pudong, à Shanghai. « Rouler sans roue, voler sans aile. » Photo d’Alex Needham.



FIGURE 20.34. Neuf véhicules sur dix à Londres sont des G-Wiz. (Et 95 % des statistiques ne sont que pure invention.)

- 142 *La performance du vélo est d'environ la même que celle de l'éco-voiture.* Faire du vélo à une place coûte environ 1,6 kWh pour 100 km, en supposant une vitesse de 20 km/h. Pour plus de détails et de références, se référer au chapitre A, page 309.
- 142 *Le train omnibus à 8 voitures reliant Cambridge à Londres* (figure 20.4) pèse 275 tonnes et peut transporter jusqu'à 584 passagers assis. Sa vitesse maximale est de 160 km/h, et sa puissance développée est de 1,5 MW. Si toutes les places sont occupées, ce train, à pleine vitesse, consomme tout au plus **1.6 kWh pour 100 p-km**.
- *Le métro de Londres.* Un train de la ligne Victoria est composé de quatre voitures motrices de 30,5 tonnes et de quatre voitures non motrices de 20,5 tonnes. A pleine charge, un train moyen pèse 228 tonnes. Sa vitesse maximale est de 70 km/h, et sa vitesse moyenne de 50 km/h. Un train dont la plupart des places sont occupées transporte environ 350 passagers ; lors qu'il est bondé, il en emporte environ 620. La consommation d'énergie aux heures de pointe est d'environ **4,4 kWh pour 100 passager-km** (Catling, 1966).
- 143 *Trains à grande vitesse.*
Le train Intercity 125 à moteur Diesel (à droite sur la figure 20.5) pèse 410 tonnes. Lorsqu'il roule à 200 km/h, la puissance fournie « au rail » est de 2,6 MW. Lorsque le train est plein, le nombre total de passagers transportés est d'environ 500. La consommation moyenne de carburant est d'environ 0,84 litre de gasoil pour 100 places-km [5o5x5m], ce qui représente un coût de transport d'environ **9 kWh pour 100 places-km**. Le train électrique Class 91 (à gauche sur la figure 20.5) roule à 225 km/h et consomme 4,5 MW. Selon Roger Kemp, la consommation moyenne d'énergie de ce train est de **3 kWh pour 100 places-km** [5o5x5m]. Le document du gouvernement [5fbeg9] précise que les trains à grande vitesse des côtes est et ouest consomment environ 15 kWh par km (train entier). Le nombre de places dans chaque train est respectivement de 526 et de 470. Ce qui donne donc entre **2,9 et 3,2 kWh pour 100 places-km**.
- *Le coût énergétique total de toutes les rames de métro de Londres était de 15 kWh pour 100 p-km[...] Le coût énergétique total de tous les autobus de Londres était de 32 kWh pour 100 p-km.* Source : [679rpc]. Source concernant la vitesse des trains et des bus : Ridley et Catling (1982).
- 144 *Le Tramlink de Croydon.*
www.tfl.gov.uk/assets/downloads/corporate/TfL-environment-report-2007.pdf, www.tfl.gov.uk/assets/downloads/corporate/London-Travel-Report-2007-final.pdf, www.croydon-tramlink.co.uk.
- 146 *... d'excellentes infrastructures pour le vélo ...* Le Guide de conception des rues du Royaume-Uni [www.manualforstreets.org.uk] encourage une conception des rues qui impose une vitesse naturelle de 30 km/h. Voir aussi Franklin (2007).
- 147 *Une méthode simple et équitable pour gérer la participation financière aux embouteillages.* C'est Stephen Salter qui m'a indiqué une excellente manière d'instaurer une taxe anti-embouteillage. Le simple péage urbain à la journée,

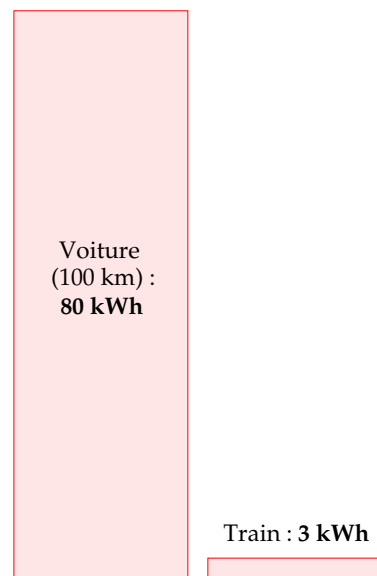


FIGURE 20.35. 100 km dans une voiture transportant une seule personne, comparés à 100 km en train à grande vitesse, électrique et entièrement plein.



FIGURE 20.36. Des tramways qui fonctionnent bien à Istanbul et aussi à Prague.

comme celui actuellement en vigueur à Londres, n'envoie qu'un signal rudimentaire aux conducteurs, en les taxant dès qu'ils atteignent la zone de péage. Une fois que le propriétaire d'une voiture a décidé de payer le prix pour une journée et qu'il a atteint une zone embouteillée, il ne reçoit plus aucune incitation à rouler *peu*, ou moins que ce qu'il avait prévu, dans cette zone. Et il n'est aucunement récompensé par un quelconque rabais s'il choisit avec soin sa route dans la zone pour éviter un embouteillage.

Au lieu d'avoir un système de péage centralisé qui décide à l'avance quand et où il faut payer pour les embouteillages, ce qui oblige en plus à faire appel à des installations coûteuses et intrusives pour surveiller et enregistrer les mouvements des véhicules à l'entrée et au sein de chaque zone, Salter propose une méthode bien plus simple, décentralisée et anonyme pour facturer aux conducteurs le fait de circuler dans un trafic automobile lent et chargé, partout où et quand cela a lieu. De plus, le système pourrait fonctionner n'importe où dans le pays. Voici comment cela marche. Il nous faut un dispositif qui réponde à la question « à quel point le trafic dans lequel je suis est-il chargé ? » Une bonne mesure du niveau d'embouteillage là où l'on se trouve est la réponse à la question : « combien y a-t-il de véhicules actifs près de moi ? » Lorsque la circulation est fluide, les voitures sont plus éloignées les unes des autres que lorsque le trafic est lent. C'est quand il est complètement bouché que le trafic est le plus dense. Le nombre de véhicules actifs qui sont tout près peuvent être détectés de manière anonyme en installant dans chaque véhicule un petit émetteur-récepteur radio (un peu comme un téléphone portable très bon marché) qui émet des petits bips par radio à intervalle régulier dès que le moteur est en marche, et qui compte le nombre de bips qu'il reçoit des véhicules environnants. Le montant du péage urbain serait alors proportionnel au nombre de bips reçus ; cette taxe pourrait être payée aux stations services à chaque fois que le conducteur fait du carburant. Et l'émetteur-récepteur radio remplacerait avantageusement le disque de taxation actuellement utilisé au Royaume-Uni.

- 149 *Les systèmes de récupération d'énergie qui reposent sur des volants d'inertie et de l'hydraulique récupèrent au moins 70 % de l'énergie du freinage.* De l'air comprimé est utilisé pour récupérer l'énergie du freinage sur les camions ; *eaton.com* annonce que son système « *hydraulic launch assist* » récupère 70 % de l'énergie cinétique [5cp27j].

Le système à volant d'inertie de *flybridsystems.com* absorbe également 70 % de l'énergie cinétique. www.flybridsystems.com/F1System.html

Le freinage à récupération électrique préserve en gros 50 % de l'énergie dissipée lors du freinage. Source : E4tech (2007).

- *Pour être capables de fournir 60 kW de puissance, il faudrait que les batteries électriques pèsent dans les 200 kg.* De bonnes batteries lithium-ion ont une puissance massique (c'est-à-dire une puissance par kilogramme de batterie) de 300 W/kg (Horie et al. (1997) ; Mindl (2003)).

- 150 *en moyenne, les voitures neuves au Royaume-Uni émettent 168 g de CO₂ par km.* C'est le chiffre pour l'année 2006 (King, 2008). La moyenne des émissions des véhicules particuliers neufs aux États-Unis était de 255 g par km (King, 2008).

- 149 *La Toyota Prius a un moteur plus efficace.* Le moteur à essence de la Prius utilise un cycle Atkinson, plutôt que l'habituel cycle Otto. En mélangeant astucieusement la puissance électrique et celle de l'essence selon la conduite du conducteur, la Prius s'en sort avec un moteur plus petit que ce que l'on trouve habituellement à bord d'une voiture aussi lourde, et elle convertit plus efficacement l'énergie de l'essence qu'un moteur à essence conventionnel.
- 150 *Les technologies hybrides semblent permettre des économies d'énergie de 20 ou 30 %.* Par exemple, si on lit le rapport de recherche de Hitachi qui décrit les trains hybrides (Kaneko et al., 2004) : « on s'attend à ce que [la génération de puissance à haute efficacité et la récupération d'énergie au freinage] permettent d'économiser environ 20 % de carburant comparé à des trains traditionnels à motrice Diesel. »
- 151 *Seulement 8,3 % des gens font plus de 30 km pour aller travailler.* Source : Edington (2006). La dépendance de l'autonomie d'une voiture électrique à la taille de ses batteries est discutée dans le chapitre A (page 308).
- ... en supposant que l'électricité a une empreinte carbone de 500 g de CO₂ par kWh. Ce niveau d'émissions de CO₂ pour l'électricité sont ceux de la Grande-Bretagne. En France, selon l'ADEME, la production d'1 kWh d'électricité émet en moyenne 180 g de CO₂ environ.
 - *Panorama de véhicules électriques.* Ils sont énumérés ci-dessous, sans ordre particulier. Les chiffres de performance proviennent principalement des constructeurs. Comme nous l'avons vu page 151, les performances réelles ne correspondent pas toujours aux allégations des constructeurs.

Th!nk Voitures électriques fabriquées en Norvège. La Th!nk Ox a cinq portes et son autonomie est de 200 km. Ses batteries pèsent 350 kg, et la voiture pèse en tout 1 500 kg. Sa consommation d'énergie est d'environ **20 kWh pour 100 km**. www.think.no

Smart électrique « La version électrique est mue par un moteur de 40 chevaux ; elle peut parcourir jusqu'à 110 kilomètres et a une vitesse de pointe de 110 km/h. La recharge s'effectue sur une prise électrique standard et coûte environ 1,5 €, soit la production de l'équivalent de 60 g/km d'émissions de CO₂ par la centrale électrique. [cf. la Smart équivalente mue par un moteur à essence émet 116 g/km de CO₂.] Une charge complète prend environ huit heures, mais la batterie peut être rechargée de 20 % à 80 % de sa charge en à peu près trois heures et demi. » [www.whatcar.com/news-article.aspx?NA=226488]

Berlingo Electrique 500E, un utilitaire urbain (figure 20.20), qui dispose de 27 batteries nickel-cadmium et d'un moteur de 28 kW. Il peut transporter une charge utile de 500 kg. Vitesse de pointe : 100 km/h ; autonomie : 100 km ; consommation : **25 kWh pour 100 km**. (Ces estimations ont été aimablement fournies par un propriétaire de Berlingo.) [4wm2w4]

i MiEV Cette voiture électrique est annoncée avec une autonomie de 160 km, et un ensemble de batteries de 16 kWh. Cela fait **10 kWh pour 100 km** — mieux que le G-Wiz — et alors qu'il est difficile de faire tenir deux Européens



FIGURE 20.37. Th!nk Ox. Photo de www.think.no.



FIGURE 20.38. La i MiEV de Mitsubishi Motors Corporation. Elle a un moteur de 47 kW, pèse 1 080 kg, et une vitesse de pointe de 130 km/h.

adultes dans une G-Wiz, le prototype de Mitsubishi a quatre portes et quatre vraies places (figure 20.38). [658ode]

EV1 Ce véhicule deux places de General Motors a une autonomie comprise entre 120 et 240 km, une vitesse de pointe de 130 km/h, et des batteries nickel-hydrure métallique stockant 26,4 kWh. Cela fait une consommation d'énergie comprise **entre 11 et 22 kWh pour 100 km**.

Lightning (figure 20.39) Cette voiture possède quatre moteurs sans balai, un dans chaque roue ; elle dispose d'un système de récupération d'énergie au freinage, et de batteries Nanosafe à charge rapide au lithium-titanate pouvant stocker 36 kWh. ce qui lui confère une autonomie de 320 km. Cela fait **11 kWh pour 100 km**.

Aptera Ce fantastique poisson fuyant est un véhicule à deux places, qui prétend avoir une consommation d'énergie de **6 kWh pour 100 km**. Elle a un coefficient de pénétration dans l'air (Cx) de 0,11 (figure 20.40). Des versions électriques et des modèles hybrides sont en cours de développement.

Loremo Comme l'Aptera, la Loremo (figure 20.41) a une surface frontale réduite et un faible coefficient de pénétration dans l'air (0,2) ; elle devrait être disponible à la fois dans des versions électriques et à carburant fossile. Elle dispose de deux places adultes et de deux places enfant à l'arrière. La Loremo EV aura des batteries lithium-ion ; elle est annoncée avec un coût énergétique de **6 kWh pour 100 km**, une vitesse de pointe de 170 km/h, et une autonomie de 153 km. Elle pèse 600 kg.

eBox La eBox possède une batterie lithium-ion d'une capacité de 35 kWh et pèse 280 kg, offrant une autonomie de 140 à 180 kilomètres. Son moteur a une puissance en crête de 120 kW et peut produire une puissance en continu de 50 kW. Consommation d'énergie : **12 kWh pour 100 km**.

Ze-0 Une voiture à cinq portes et cinq places. Vitesse de pointe : 80 km/h. Autonomie : 80 kilomètres. Poids total : 1 350 kg. Les batteries acide-plomb ont une capacité de 18 kWh. Moteur : 15 kW. **22,4 kWh pour 100 km**.

e500 Une voiture italienne ressemblant à une Fiat, avec deux portes et quatre places. Vitesse de pointe : 95 km/h ; autonomie en ville : 120 km. Batterie : lithium-polymère.

MyCar Une voiture à deux places, de conception italienne. Vitesse de pointe : 65 km/h. Autonomie maximale : 95 km. Batteries acide-plomb.

Mega City Une voiture à deux places avec une puissance maximale en continu de 4 kW et une vitesse de pointe de 65 km/h : **11,5 kWh pour 100 km**. Poids à vide (avec les batteries) de 725 kg. Les batteries acide-plomb ont une capacité de 10 kWh.

Xebra Annoncée avec une autonomie de 40 km à partir d'une charge de 4,75 kWh, soit une consommation de **12 kWh pour 100 km**. Vitesse de pointe : 65 km/h. Batteries acide-plomb.



FIGURE 20.39. Lightning : **11 kWh pour 100 km**. Photo de www.lightningcarcompany.co.uk.



FIGURE 20.40. L'Aptera. **6 kWh pour 100 km**. Photo de www.aptera.com.



FIGURE 20.41. La Loremo. **6 kWh pour 100 km**. Photo de evolution.loremo.com.

TREV Ce « véhicule à deux places et énergie renouvelable » (traduction de l'anglais « *Two-Seater Renewable Energy Vehicle* » ou TREV) est un prototype développé par l'Université d'Australie du sud (figure 20.42). Ce véhicule à trois roues a une autonomie de 150 km, une vitesse de pointe de 120 km/h, une masse de 300 kg, et des batteries lithium-polymère qui pèsent 45 kg. Au cours d'un voyage réel de 3 000 kilomètres, la consommation d'énergie de ce véhicule a été de **6,2 kWh pour 100 km**.

Venturi Fetish La Venturi Fetish possède une batterie de 28 kWh qui pèse 248 kg. La voiture pèse 1 000 kg et a une autonomie de 160 à 250 km. Cela fait **entre 11 et 17 kWh pour 100 km**.

www.venturifetish.fr/fetish.html

Toyota RAV4 EV Ce véhicule — un mini 4x4 tout-électrique a été commercialisé par Toyota entre 1997 et 2003 (figure 20.43). Le RAV4 EV dispose de 24 batteries nickel-hydrure métallique de 12 volts et 95 ampères-heures, capables de stocker 27,4 kWh d'énergie; elle a une autonomie de 130 à 190 kilomètres. Cela fait une consommation d'énergie de **14 à 21 kWh pour 100 km**. Le RAV4 EV a été populaire auprès de la police de Jersey.

Phoenix SUT Il s'agit d'un 4x4 à cinq places fabriqué en Californie, qui a une autonomie allant « jusqu'à 210 kilomètres » à partir d'un ensemble de batteries lithium-ion d'une capacité de 35 kWh (ce qui fait **17 kWh pour 100 km**.) Les batteries peuvent être rechargées avec une prise spéciale en 10 minutes.

www.gizmag.com/go/7446/

Modécvéhicule utilitaire Le Modéc est un véhicule de livraison qui peut transporter deux tonnes de charge utile sur 160 kilomètres. Poids à vide : 3 000 kg.

www.modéc.co.uk

Smith Ampere Un petit véhicule de livraison plus petit, avec des batteries lithium-ion d'une capacité de 24 kWh. Autonomie « supérieure à 160 kilomètres ».

www.smithelectricvehicles.com

Minibus électriques Tiré de www.smithelectricvehicles.com :

Batteries lithium-ion d'une capacité de 40 kWh. Moteur de 90 kW avec récupération d'énergie au freinage. Autonomie « supérieure à 160 kilomètres ». 15 places. Poids à vide du véhicule : 3 026 kg. Charge utile : 1 224 kg. Cela fait une performance pour ce véhicule d'au mieux **25 kWh pour 100 km**. A pleine charge, il pourrait fournir du transport avec un coût impressionnant de **2 kWh pour 100 p-km**.

Autocar électrique Le bus Thunder Sky a une autonomie de 290 kilomètres et une durée de recharge de trois heures. www.thunder-sky.com

Scooters électriques Le Vectrix est un scooter de poids (figure 20.44). Ses batteries (nickel-hydrure métallique) ont une capacité de 3,7 kWh. Il peut parcourir 110 kilomètres à une vitesse de 40 km/h, après une charge de deux heures sur une prise électrique standard. Cela fait 110 km pour 3 kWh, soit **2,75 kWh pour 100 km**. Sa vitesse de pointe est de 100 km/h. Il pèse 210 kg et a une puissance en crête de 20 kW. www.vectrix.com

L'« Oxygen Cargo » est un scooter plus petit. Il pèse 121 kg, a une autonomie de 60 kilomètres, et il a besoin de 2 à 3 heures pour être rechargé. Puissance



FIGURE 20.42. Le TREV. **6 kWh pour 100 km**. Photo de www.unisa.edu.au.



FIGURE 20.43. Toyota RAV4 EV. Photo de Kenneth Adelman, www.solarwarrior.com.



FIGURE 20.44. Vectrix : **2,75 kWh pour 100 km**. Photo de www.vectrix.com.

en crête : 3,5 kW. Vitesse de pointe : 45 km/h. Il dispose de deux batteries lithium-ion et d'un système de récupération d'énergie au freinage. Son autonomie peut être étendue en ajoutant des batteries supplémentaires, qui stockent environ 1,2 kWh et pèsent 15 kg chacune. Consommation d'énergie : 4 kWh pour 100 km.

- 153 *L'énergie massique des réservoirs d'air comprimé n'est que d'environ 11 à 28 Wh par kg.* La limite théorique, en supposant une compression isotherme parfaite, se calcule ainsi : si 1 m³ d'air ambiant est lentement comprimé dans un récipient de 5 litres à 200 bars, l'énergie potentielle emmagasinée est de 0,16 kWh dans 1,2 kg d'air. En pratique, un réservoir de 5 litres qui supporte ce genre de pression pèse environ 7,5 kg s'il est en acier, et 2 kg s'il est fait de Kevlar ou de fibres de carbone, et l'énergie massique globale atteinte serait alors de 11 à 28 Wh par kg. La densité d'énergie théorique est la même, quelle que soit le volume du récipient.

- 154 « *le gouverneur, un 'action hero' du climat au quotidien* ». Notez le jeu de mots avec le titre de l'un des films de l'acteur, « *Last action hero* ».

Arnold Schwarzenegger ...remplissant le réservoir d'un Hummer fonctionnant à l'hydrogène. *Nature* 438, 24 novembre 2005. Je ne dis pas que l'hydrogène ne sera *jamais* utile pour le transport, mais j'aurais espéré qu'une revue aussi sérieuse et distinguée que *Nature* considère le battage autour de l'hydrogène avec une approche un tant soit peu critique, et pas seulement euphorique.

En septembre 2008, *The Economist* écrivait « Presque plus personne ne conteste que ... la plupart des voitures seront, à terme, uniquement alimentées par des batteries. »

D'un autre côté, si l'on veut en entendre plus venant des partisans du transport à l'hydrogène, on peut se référer aux pages du Rocky Mountain Institute sur « l'HyperCar » www.rmi.org/hypercar/.

« L'hydrogène et les piles à combustible ne sont pas la bonne voie. La décision de l'administration Bush et de l'État de Californie d'emprunter la route de l'hydrogène est tout simplement la pire décision qui ait été prise ces dernières années ».

James Woolsey,
président du Comité Consultatif de la Fondation américaine sur les énergies propres
« US Clean Fuels Foundation », 27 novembre 2007

- *Dans le projet Clean Urban Transport for Europe, ravitailler en combustible les autobus à hydrogène requerrait entre 80 et 200 % d'énergie en plus que les bus à moteur Diesel de référence.* Source : CUTE (2006), Binder et al. (2006).
- *Alimenter la voiture à hydrogène fabriqué par BMW nécessite trois fois plus d'énergie qu'une voiture moyenne.* La moitié du coffre de la voiture BMW « Hydrogen 7 » est occupée par son réservoir d'hydrogène de 170 litres, soit 8 kg d'hydrogène, ce qui lui donne une autonomie de 200 km. [news.bbc.co.uk/1/hi/business/6154212.stm]. La valeur calorifique de l'hydrogène est de 39 kWh par kg, et si on suit les meilleures pratiques connues, le coût énergétique pour fabriquer de l'hydrogène est de 63 kWh par kg (composé de 52 kWh de gaz naturel et de 11 kWh d'électricité) (CUTE, 2006). Remplir le réservoir de 8 kg a donc un coût énergétique d'au moins 508 kWh; et si ce réservoir offre effectivement 200 km d'autonomie, le coût de l'énergie est de 254 kWh pour 100 km.

« L'Hydrogen 7 et ses cousins à pile à combustible hydrogène sont, à bien des égards, de simple miroirs aux alouettes ».

David Talbot, MIT Technology Review
www.technologyreview.com/Energy/18301/

La voiture de Honda à pile à combustible, la FCX Clarity, pèse 1 625 kg, stocke 4,1 kg d'hydrogène à une pression de 345 bars, et, paraît-il, a une autonomie de 450 kilomètres, en étant capable de parcourir 91 km par kg d'hydrogène dans un cycle mixte standardisé de conduite [czjjo], [5a3ryx]. En prenant le coût de production de l'hydrogène mentionné dans la note précédente, et en supposant que le gaz naturel est utilisé comme principale source d'énergie, cette voiture a un coût de transport de 69 kWh pour 100 km.

« Honda peut sans doute amuser les journalistes et leur faire croire que les voitures à hydrogène sont « zéro-émission ». Mais malheureusement, il est impossible de tromper le climat ».

Merrick Godhaven

- 157 *Une batterie lithium-ion contient 3 % de lithium.* Source : Fisher et al. (2006).
- *Le spécialiste du lithium R. Keith Evans affirme que « les inquiétudes au sujet de la disponibilité du lithium [...] sont sans fondement »* – Evans (2008).
- 158 *Deux paquebots néerlandais connus sous le nom des « Jumeaux Économiques »* www.ssmaritime.com/rijndam-maasdam.htm.
Queen Elisabeth II : www.qe2.org.uk.
- 159 *Train à sustentation magnétique Transrapid.* www.transrapid.de.

21 Un chauffage plus intelligent

Dans le chapitre précédent, nous avons appris que l'électrification pouvait réduire la consommation d'énergie des transports à un cinquième de son niveau actuel, et que les transports publics et le vélo pouvaient être environ 40 fois plus efficaces en énergie que les déplacements en voiture. Qu'en est-il pour le chauffage ? Quelle quantité d'énergie peut-on économiser par un changement de technologie ou de comportement ?

Le calcul de la puissance consommée pour le chauffage d'un bâtiment repose sur trois termes :

$$\text{puissance consommée} = \frac{\text{différence moyenne de température} \times \text{déperditions du bâtiment}}{\text{rendement du système de chauffage}}.$$

Laissez-moi vous expliquer cette formule, qui est développée en détail dans le chapitre E avec un exemple. Ma maison, construite aux environs de 1940, est jumelée et comprend trois chambres (figure 21.1). L'écart moyen de température entre l'intérieur et l'extérieur de la maison dépend du réglage du thermostat et du temps qu'il fait. Si le thermostat est en permanence à 20 °C, l'écart de température moyen est environ de 9 °C. Les pertes thermiques du bâtiment expriment à quelle vitesse la chaleur s'échappe à travers les murs, les fenêtres, les fissures, en fonction de l'écart de température. Les pertes thermiques sont parfois appelées *coefficient de pertes thermiques* du bâtiment. Ce coefficient est mesuré en kWh par jour et par degré d'écart de température. Dans le chapitre E, j'ai calculé que les déperditions thermiques de ma maison en 2006 étaient de 7,7 kWh/j/°C. Le produit

$$\text{différence de température moyenne} \times \text{déperditions du bâtiment}$$

représente le rythme des pertes de chaleur de la maison par conduction et par ventilation. Par exemple, si l'écart de température moyen est de 9 °C, alors la perte de chaleur est de :

$$9^{\circ}\text{C} \times 7,7 \text{ kWh/j/}^{\circ}\text{C} \simeq 70 \text{ kWh/j.}$$

Enfin, pour calculer la puissance totale, il faut diviser la puissance perdue par le rendement du système de chauffage. Dans ma maison, la chaudière à condensation a un rendement de 90 %. Nous trouvons donc :

$$\text{puissance consommée} = \frac{9^{\circ}\text{C} \times 7,7 \text{ kWh/j/}^{\circ}\text{C}}{0,9} = 77 \text{ kWh/j.}$$

Cette valeur est supérieure aux besoins que nous avons estimés dans le chapitre 7. Ceci pour 2 raisons : tout d'abord, cette formule suppose que



FIGURE 21.1. Ma maison.

toute la chaleur est fournie par la chaudière, alors qu'en fait, de la chaleur additionnelle gratuite est apportée par le dégagement de chaleur des occupants, par les appareils domestiques et le soleil. Ensuite, dans le chapitre 7, nous avons supposé que seulement deux pièces étaient chauffées à 20 °C en permanence. Maintenir en permanence une maison entière à cette température demanderait plus d'énergie.

Alors, comment pouvons-nous réduire l'énergie nécessaire pour le chauffage ? De manière évidente, il y a trois approches possibles.

1. Réduire l'écart de température moyen. Cela peut être obtenu en réglant le thermostat plus bas (Ou, si vous avez des amis bien placés, en changeant le climat local...)
2. Réduire les pertes thermiques du bâtiment. Cela peut être fait en améliorant l'isolation du bâtiment — pensez au triple vitrage, au calfeutrage, et à une très bonne isolation du grenier — ou, de façon plus radicale, en démolissant le bâtiment et en le remplaçant par un bâtiment mieux isolé ; ou encore en vivant dans un logement ayant une plus petite surface par personne. (Les pertes augmentent avec la surface de plancher d'un bâtiment, parce que les surfaces des parois externes, les fenêtres, et le toit augmentent aussi.)
3. Accroître le rendement du système de chauffage. Vous pourriez penser que 90 % semble difficile à dépasser, mais en fait, nous pouvons faire beaucoup mieux.

Le thermostat

Si on considère le rapport qualité-prix d'une technologie, le thermostat (accompagné d'un pull-over) est difficile à battre. Vous diminuez le réglage du thermostat, et votre logement consomme moins d'énergie. C'est magique ! En Grande-Bretagne, pour chaque degré en moins du thermostat, les pertes de chaleur diminuent d'environ 10 %. Baisser le thermostat de 20 °C à 15 °C diminuerait de près de moitié les pertes de chaleur. Grâce aux apports de chaleur « gratuite », les économies d'énergie de chauffage seront encore plus grandes que les réductions des pertes.

Malheureusement, cette remarquable méthode d'économie d'énergie a des effets secondaires. Certaines personnes considèrent le fait de baisser le thermostat comme un changement de mode de vie, et cela les mécontente. Je vais faire plus tard quelques suggestions sur le moyen de contourner ce problème de mode de vie. En attendant, pour prouver que « l'élément intelligent le plus important dans un immeuble équipé d'un chauffage intelligent, c'est l'occupant », la figure 21.2 montre les données d'une étude du « Carbon Trust * », mesurant la consommation de chaleur dans douze maisons modernes identiques. Cette étude nous laisse bouche bée devant la famille numéro 1, dont la consommation de chaleur est deux fois plus grande que celle de M. et Mme Laineux au numéro 12. Toutefois,

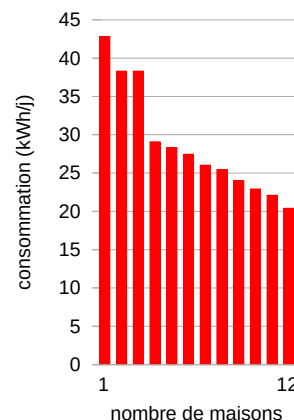


FIGURE 21.2. Consommation réelle de chaleur dans 12 maisons identiques disposant de systèmes de chauffage identiques. Toutes les maisons ont une surface habitable de 86 m² et ont été conçues pour avoir des déperditions thermiques de 2,7 kWh/j/°C.

Source : Carbon Trust (2007).

en prêtant plus attention aux chiffres, on réalise que la famille numéro 1 consomme 43 kWh par jour. Ce chiffre est si énorme qu'il en est choquant. Mais attendez. . . N'avais-je pas estimé il y a un instant que *ma propre* maison pouvait consommer encore plus que cela ? En effet, ma consommation moyenne de gaz de 1993 à 2003 a été d'un peu plus de 43 kWh par jour (figure 7.9, page 62). Et moi qui pensais que j'étais une personne économe ! Mais le problème, c'est la *maison*. Toutes les maisons modernes dans l'étude du « Carbon Trust » ont des pertes thermiques de $2,7 \text{ kWh/j/}^{\circ}\text{C}$, alors que ma maison avait des pertes de $7,7 \text{ kWh/j/}^{\circ}\text{C}$! Ah, tous ces gens qui vivent dans des maisons bourrées de pertes thermiques. . .

La guerre contre les pertes thermiques

Que peut-on faire face à de vieilles maisons pleines de fuites de chaleur, à part appeler les bulldozers ? La figure 21.3 présente les estimations de chauffage nécessaire dans les maisons anciennes, en fonction de leur implantation : séparée des autres maisons, partiellement attenante, attenante. Ajouter une isolation des combles et une isolation des murs doubles réduit les pertes de chaleur d'une vieille maison ordinaire d'environ 25 %. Grâce aux apports de chaleur secondaires, cette réduction de 25 % des pertes se traduit par une réduction d'environ 40 % dans la consommation de chauffage.

Mettons ces quelques idées à l'épreuve des faits.

Une étude de cas

Je vous ai présenté ma maison quelques pages plus haut. Reprenons l'histoire. En 2004, j'avais fait installer une chaudière à condensation, en remplacement de l'ancienne chaudière à gaz. (Les chaudières à condensation utilisent un échangeur de chaleur pour transférer la chaleur latente des gaz brûlés vers l'air entrant.) Dans le même temps, j'avais fait enlever le ballon d'eau chaude de la maison (de sorte que l'eau chaude ne soit produite que sur demande), et j'ai fait installer des thermostats sur tous les radiateurs des chambres. Avec la nouvelle chaudière à condensation, a été installé un nouveau régulateur de chauffage qui me permet de régler la température aux différents moments de la journée. Avec ces changements, ma consommation est passée de 50 kWh/j en moyenne à environ 32 kWh/j.

Cette réduction de 50 à 32 kWh/j est déjà très satisfaisante, mais ce n'est pas assez si l'objectif est de réduire l'empreinte énergétique en combustibles fossiles de chacun à moins d'une tonne de CO_2 par an. 32 kWh/j de gaz, cela correspond à plus de 2 tonnes de CO_2 par an.

En 2007, j'ai commencé à faire plus attention à mes compteurs d'énergie. J'ai fait isoler les murs doubles (figure 21.5) et amélioré l'isolation du grenier. J'ai remplacé la porte de service à simple vitrage par une porte



FIGURE 21.5. Insertion d'une isolation des murs creux.



FIGURE 21.6. Une nouvelle porte d'entrée.

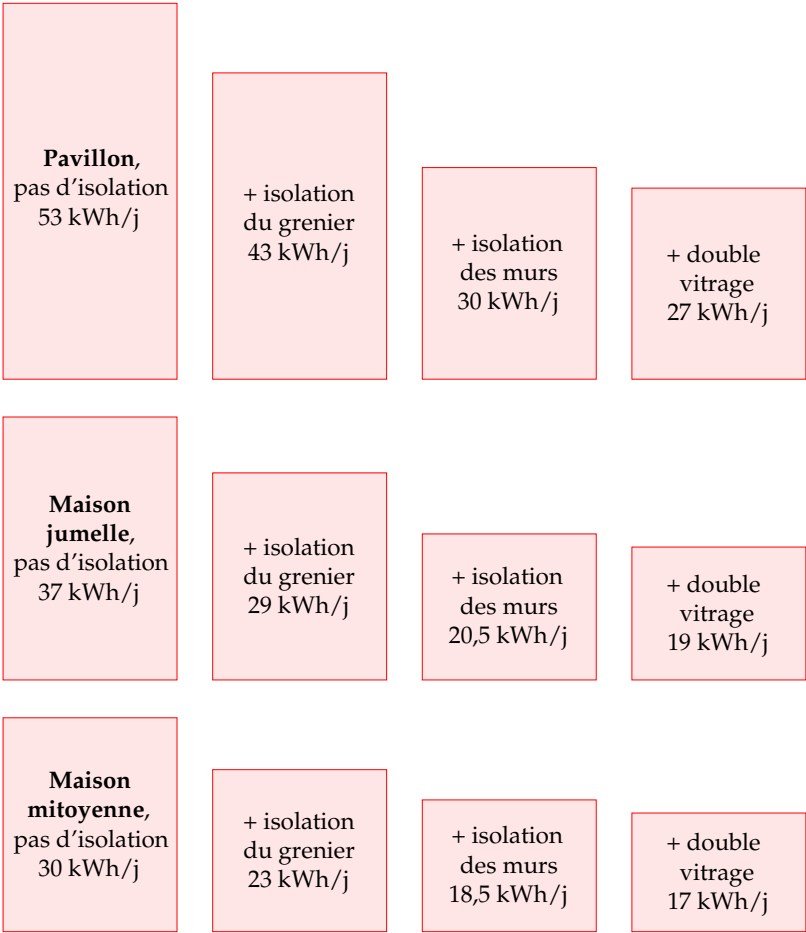


FIGURE 21.3. Estimations du chauffage d'air nécessaire pour différents types de maisons au Royaume-Uni. Les données proviennent de Eden et Bending (1985).

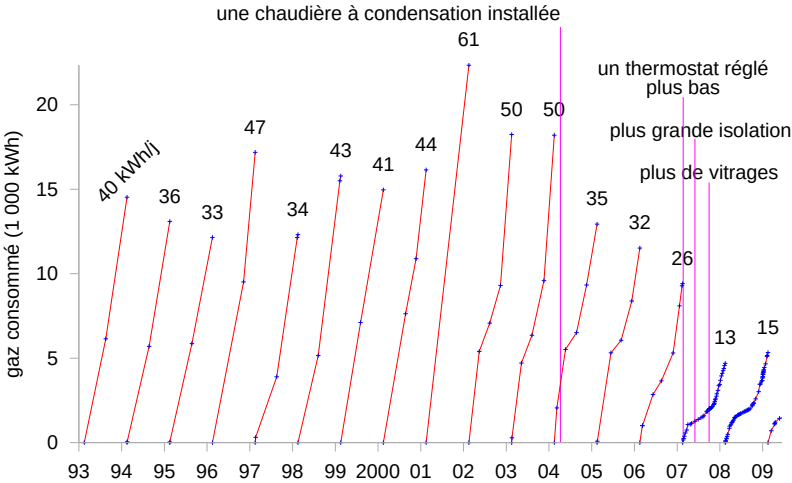


FIGURE 21.4. Ma consommation annuelle de gaz domestique, entre 1993 et 2007. Chaque ligne montre la consommation cumulée durant un an, en kWh. Le nombre à la fin de chaque année est le rythme de consommation moyen pour cette année-là, en kWh par jour. Les relevés au compteur sont indiqués par les points bleus. Évidemment, plus je relève ma consommation souvent, moins je consomme de gaz entre deux relevés !

à double vitrage, et ajouté une porte supplémentaire à double vitrage sur le perron figure 21.6). Et ce qui est le plus important, j'ai fait plus attention aux réglages de mon thermostat. Tous ces efforts ont conduit à une réduction de moitié de la consommation de gaz. La consommation de la dernière année était de 13 kWh/j !

Ayant modifié en même temps différents éléments de ma maison et certains de mes comportements, il est difficile de savoir quels changements ont été les plus importants. Selon mes calculs (dans le chapitre E), les améliorations d'isolation ont réduit les pertes thermiques de 25 %, passant de 7,7 kWh/j/°C à 5,8 kWh/j/°C. soit une valeur qui reste supérieure à celle des maisons modernes. Qu'il est désespérément difficile de réduire les pertes d'une maison déjà construite !

Donc, mon conseil est, en priorité, de gérer astucieusement le thermostat. Que doit viser un réglage raisonnable du thermostat ? De nos jours, beaucoup de gens semblent penser que 17 °C est insupportablement froid. Cependant en 1970, la température moyenne en hiver dans les maisons anglaises était de 13 °C ! La perception de savoir si on se sent au chaud dépend de ce que l'on fait, et de ce que l'on a fait dans l'heure précédente. Ma suggestion est de *ne pas penser en termes de réglages de thermostat*. Plutôt que de fixer le thermostat à une valeur unique, laissez-le à une valeur très faible la plupart du temps (disons, 13 ou 15 °C), et augmentez-le temporairement lorsque vous avez froid. C'est comme les lumières dans une bibliothèque. Si vous vous posez la question « quel est le bon niveau de lumière sur les étagères ? », alors vous répondrez sûrement « assez lumineux pour lire les titres des livres », et ainsi vous aurez des lumières fortes tout le temps. Cette question présuppose que nous avons à déterminer le niveau de lumière, mais nous n'avons pas besoin de le faire. Nous pouvons placer des interrupteurs que le lecteur allumera, et qui se couperont après un temps approprié. De même, les thermostats ne doivent pas être laissés à 20 °C en permanence.

Avant de terminer avec les réglages du thermostat, je dois mentionner la climatisation. Est-ce que cela ne vous rend pas fou d'aller dans un bâtiment en été quand le thermostat de la climatisation est fixé à 18 °C ? Ces farfelus de gestionnaires d'immeubles soumettent tout le monde à des températures hivernales et ils vont se plaindre d'avoir froid ! Au Japon, les directives gouvernementales recommandent que la climatisation soit réglée à 28 °C.

De meilleures constructions

Si vous avez l'occasion de faire construire un nouveau bâtiment, alors il y a beaucoup de façons de veiller à ce que sa consommation de chauffage soit très inférieure à celle d'un vieux bâtiment. La figure 21.2 montre que les maisons modernes sont construites avec de bien meilleurs niveaux d'isolation que celles des années 1940. Mais les normes de construction

en Grande-Bretagne pourraient être encore améliorées, comme l'indique le chapitre E. Les trois idées-clés pour de meilleurs résultats sont les suivantes : (1) une isolation très épaisse pour les planchers, les murs et les toitures ; (2) s'assurer que le bâtiment est complètement étanche, utiliser une ventilation mécanique pour introduire de l'air frais et évacuer l'air vicié et humide, avec des échangeurs récupérant une grande partie de la chaleur de l'air évacué ; (3) un bâtiment conçu pour exploiter autant que possible le soleil.

Le coût énergétique du chauffage

Jusqu'à présent, ce chapitre a mis l'accent sur le **contrôle de la température** et les **pertes thermiques**. Maintenant tournons-nous vers le troisième facteur de l'équation :

$$\text{puissance consommée} = \frac{\text{différence moyenne de température} \times \text{déperditions du bâtiment}}{\text{rendement du système de chauffage}}.$$

Comment produire efficacement du chauffage ? Est-il possible d'obtenir de la chaleur bon marché ? Aujourd'hui en Grande-Bretagne, le chauffage est assuré principalement en brûlant un combustible fossile, le gaz naturel, dans des chaudières ayant des rendements de 78 % à 90 %. Est-il possible de se passer des combustibles fossiles, et en même temps d'améliorer l'efficacité du chauffage des bâtiments ?

Une technologie souvent présentée en Grande-Bretagne comme une réponse au problème du chauffage s'appelle la « cogénération » (ou production combinée de chaleur et d'électricité), ou bien sa cousine, la « micro-cogénération ». Je vais vous expliquer dans un instant en quoi consiste la cogénération, mais je suis arrivé à la conclusion que c'est une mauvaise idée, parce qu'il existe une meilleure technologie pour le chauffage, appelée pompe à chaleur, que je vais décrire dans quelques pages.

La production combinée de chaleur et d'électricité, ou cogénération

De l'avis général, les grosses centrales électriques sont très inefficaces, gaspillant la chaleur à tire-larigot dans les cheminées et les tours de refroidissement. Un avis plus averti reconnaît que pour convertir l'énergie thermique en électricité, il est inévitable de déverser la chaleur dans un endroit froid (figure 21.8). C'est ainsi que fonctionnent les moteurs thermiques. Pour cela, il *faut* un endroit froid. Mais bien sûr, nous pourrions utiliser des *bâtiments* comme lieu de déversement pour ces « déchets » de chaleur au lieu des tours de refroidissement ou l'eau de mer. Cette idée, on l'appelle « production combinée de chaleur et d'électricité », ou cogénération, et elle a été largement utilisée en Europe continentale durant des décennies. Dans de nombreuses villes, une centrale de grande puissance



FIGURE 21.7. Eggborough. Pas vraiment une centrale électrique qui participe au chauffage intelligent.

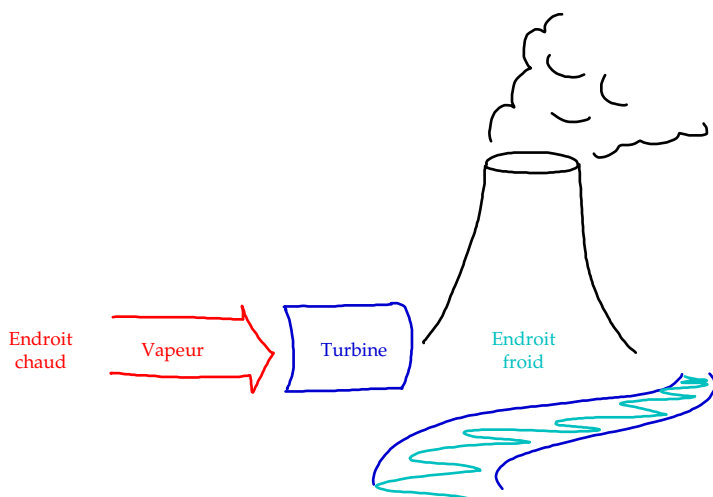


FIGURE 21.8. Comment fonctionne une centrale électrique. Il faut une zone froide pour condenser la vapeur qui va faire tourner la turbine. La zone froide est généralement une tour aéro-réfrigérante ou une rivière.

est intégrée à un système de chauffage urbain. Les partisans de l'incarnation moderne de la cogénération, la « micro-cogénération », suggèrent que de toutes petites centrales devraient être créées au sein des bâtiments individuels ou des petites collectivités, pour fournir le chauffage et l'électricité pour ces bâtiments, et pouvoir exporter de l'électricité vers le réseau électrique public.

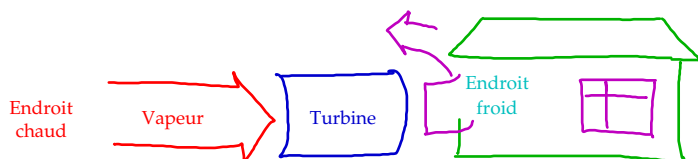


FIGURE 21.9. Cogénération. Le chauffage urbain absorbe la chaleur qui, sinon, aurait été vomie par une tour de refroidissement.

Il y a certainement du vrai dans l'idée que la Grande-Bretagne est en retard en matière de chauffage urbain et de production combinée de chaleur et d'électricité, mais la discussion est entravée par un manque de données chiffrées, et aussi par deux erreurs particulières. Tout d'abord, lorsqu'on compare les différentes manières d'utiliser du combustible, nous utilisons une mesure erronée du « rendement », en valorisant l'électricité à l'égal de la chaleur : dans les faits, l'électricité a plus de valeur que la chaleur. Deuxièmement, il est largement admis que les « déchets » de chaleur dans une centrale traditionnelle pourraient être capturés à des fins utiles *sans porter atteinte à la production d'électricité de la centrale*. Malheureusement, c'est faux, comme les chiffres vont le montrer. Fournir de la chaleur utile à un client réduit toujours, dans une certaine mesure, l'électricité produite. Les gains nets réels de la cogénération sont souvent beaucoup plus faibles que ce que le battage médiatique pourrait vous faire croire.

Un dernier obstacle à une discussion rationnelle au sujet de la cogénération est le mythe, apparu récemment, selon lequel décentraliser une tech-

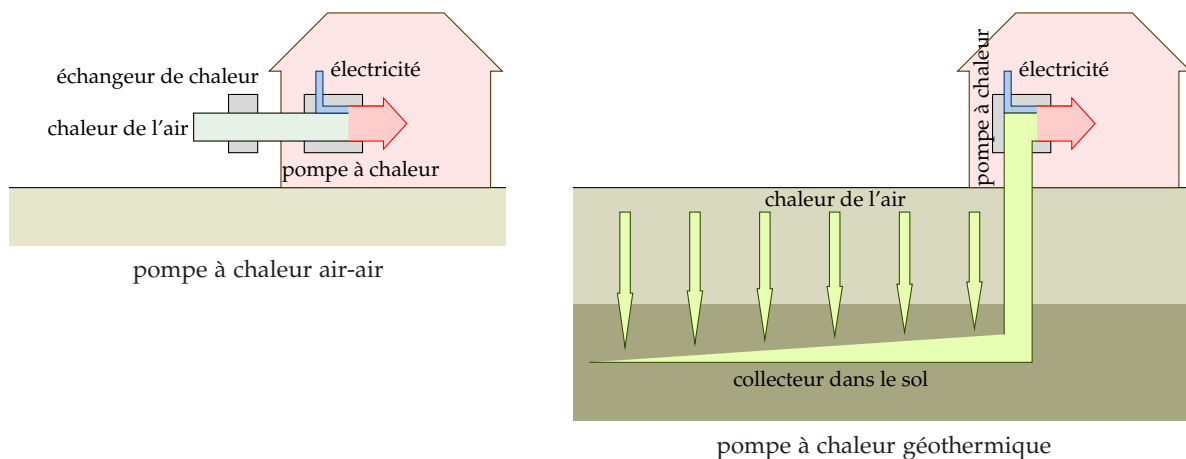


FIGURE 21.10. Pompes à chaleur.

nologie la rend d'une manière ou d'une autre plus écologique. Ainsi, alors que les grosses centrales à combustibles fossiles seraient « mauvaises », des foules de micro-centrales seraient considérées comme bonnes. Mais si la décentralisation était effectivement une bonne idée, alors l'avantage du « petit et beau » devrait sauter aux yeux à la lueur des chiffres. On ne devrait pas avoir besoin d'y croire pour que la décentralisation soit meilleure. Or ce que les chiffres montrent en réalité, c'est que la production d'électricité *centralisée* a de nombreux avantages sur la production décentralisée, tant en termes économiques qu'énergétiques. La production locale n'est un peu plus avantageuse que dans le cas des plus grands ensembles immobiliers, avec un avantage de seulement 10 % ou 20 %.

Le gouvernement a pour objectif de porter la cogénération à 10 GW de capacité électrique d'ici 2010, mais je pense que cette croissance de la cogénération à partir du gaz est une erreur, car elle n'est pas du tout verte : elle consomme des combustibles fossiles, et elle nous enferme dans l'obligation de continuer à consommer des combustibles fossiles. Puisque les pompes à chaleur sont une meilleure technologie, nous devrions sauter l'étape de la cogénération qui brûle du gaz, et aller directement vers les pompes à chaleur.

Les pompes à chaleur

Tout comme le chauffage urbain et la cogénération, les pompes à chaleur sont déjà largement utilisées en Europe continentale, mais elles le sont rarement en Grande-Bretagne. Les pompes à chaleur sont des réfrigérateurs inversés. Touchez la grille arrière de votre réfrigérateur : elle est *chaude*. Un réfrigérateur transfère de la chaleur d'un endroit (l'intérieur) vers un autre (la grille arrière). Ainsi, il est possible de chauffer un bâtiment en mettant un réfrigérateur à l'envers — mettre l'*intérieur* du réfrigé-

rateur dans le jardin, et refroidir ainsi le jardin ; et laisser la grille arrière du réfrigérateur dans votre cuisine, pour réchauffer la maison. Ce qui n'est pas évident à comprendre, c'est que cette idée délirante est un moyen très efficace pour chauffer votre maison. Pour chaque kilowatt d'électricité provenant du réseau électrique, le réfrigérateur mis à l'envers peut pomper trois kilowatts de chaleur du jardin, de sorte qu'au total, quatre kilowatts de chaleur rentrent dans votre maison. Ainsi, les pompes à chaleur sont environ quatre fois plus efficaces qu'un convecteur électrique standard. Considérant que le rendement du radiateur électrique est de 100 %, celui de la pompe à chaleur est de 400 %. Le rendement d'une pompe à chaleur est généralement appelé son *coefficient de performance* ou CoP. Si le rendement est de 400 %, le coefficient de performance est de 4.

Les pompes à chaleur peuvent être configurées de différentes façons (figure 21.10). Une pompe à chaleur peut refroidir l'air de votre jardin en utilisant un échangeur de chaleur (typiquement un coffret blanc de 1 mètre de haut, comme celui de la figure 21.11), et chauffer l'air intérieur de la maison : dans ce cas, cela s'appelle une pompe à chaleur air-air, parce qu'elle prend de la chaleur de l'air pour l'injecter dans de l'air. Elle peut aussi refroidir l'air du jardin pour réchauffer de l'eau à l'intérieur de la maison : dans ce cas, on l'appelle une pompe à chaleur air-eau. Lorsque la pompe refroidit le sol plutôt que de l'air extérieur, grâce à de grandes boucles de tuyaux enterrés (de plusieurs dizaines de mètres de long), pour ensuite réchauffer l'air intérieur, cela s'appelle une pompe à chaleur géothermique. Enfin, la chaleur peut également être pompée dans les rivières et les lacs (pompes à chaleur eau-air ou eau-eau). Certaines pompes à chaleur peuvent transférer la chaleur dans les deux sens. Quand une pompe à chaleur air-air fonctionne en sens inverse, elle utilise l'électricité pour réchauffer l'air à l'extérieur du bâtiment et refroidir l'air à l'intérieur. C'est ce qu'on appelle de la climatisation. De nombreux climatiseurs sont en effet des pompes à chaleur travaillant précisément de cette manière. Les pompes à chaleur géothermiques peuvent également fonctionner comme des climatiseurs. Un seul matériel peut donc être utilisé pour fournir à la fois le chauffage en hiver et la climatisation en été.

Les gens disent parfois que les pompes à chaleur géothermiques utilisent « l'énergie géothermique », mais ce n'est pas le bon terme. Comme nous l'avons vu dans le chapitre 16, dans la plupart des régions du monde, l'énergie géothermique offre une toute petite puissance par unité de surface (environ 50 mW/m²). Les pompes à chaleur n'ont rien à voir avec ce faible niveau de puissance, et peuvent être utilisées pour le chauffage et le refroidissement. Les pompes à chaleur géothermiques utilisent simplement le sol comme lieu d'extraction ou d'injection de la chaleur. Quand elles puisent la chaleur en permanence, la chaleur est, en fait, réapprovisionnée par les rayons du soleil.

Il nous reste deux choses à faire dans ce chapitre. Nous devons comparer les pompes à chaleur avec la cogénération. Ensuite, nous discuterons



FIGURE 21.11. Les parties intérieures et extérieures d'une pompe à chaleur air-air qui a un coefficient de performance de 4. A la partie intérieure, on a joint un style à bille, pour l'échelle. Une seule de ces machines Fujitsu peut fournir 3,6 kW de chaleur en utilisant seulement 0,845 kW d'électricité. Elle peut également fonctionner de manière inversée, fournissant 2,6 kW de froid en consommant 0,655 kW d'électricité.

des limites des pompes à chaleur géothermiques.

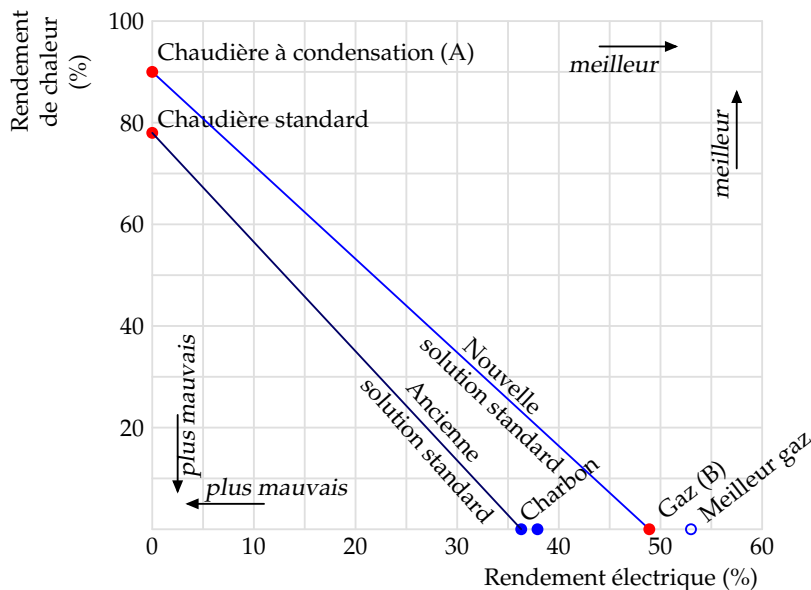
Pompes à chaleur comparées à la cogénération

J'ai longtemps pensé que la cogénération allait de soi. « De toute évidence, on devrait utiliser la chaleur rejetée par les centrales électriques pour chauffer les bâtiments plutôt que de l'évacuer dans une tour de refroidissement ! » Toutefois, en regardant attentivement les chiffres décrivant la performance des systèmes réels de cogénération, j'en suis venu à la conclusion qu'il existe de meilleures façons de fournir de l'électricité et du chauffage domestique.

Je vais construire un diagramme en trois étapes, qui va montrer combien on peut obtenir d'énergie électrique ou thermique à partir de combustible. L'axe horizontal indique le rendement électrique, et l'axe vertical le rendement thermique.

Solution standard sans cogénération

Dans la première étape, nous faisons figurer des centrales électriques simples fournissant uniquement de l'électricité et des systèmes de chauffage fournissant uniquement de la chaleur.



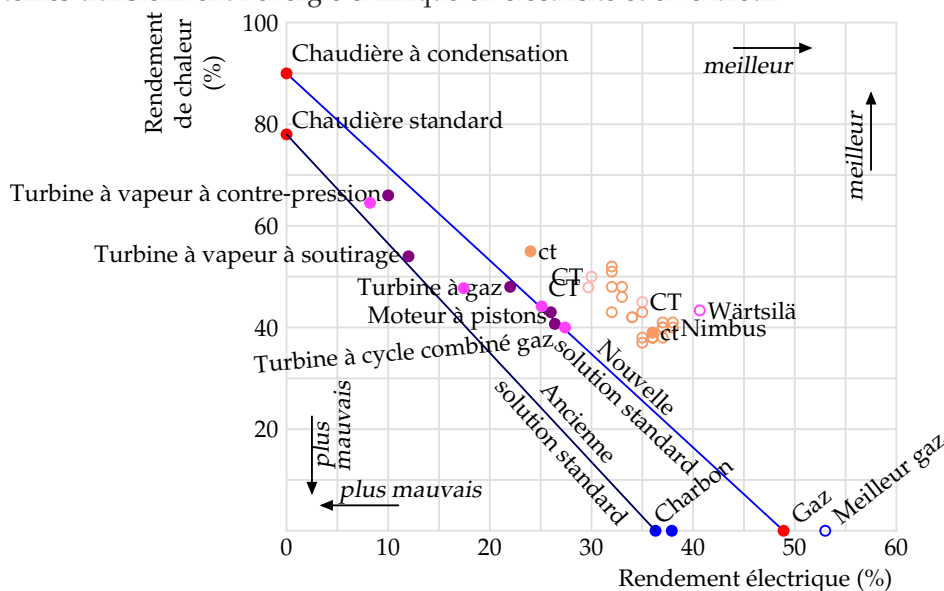
Les chaudières à condensation (point A, en haut à gauche) ont un rendement de 90 %, car 10 % de la chaleur part dans la cheminée. Les centrales électriques à gaz britanniques (point B, en bas à droite) qui transforment l'énergie chimique du gaz en électricité ont en réalité un rendement de 49 %. Si vous voulez produire n'importe quelle combinaison de chaleur et d'électricité à partir du gaz naturel, vous pouvez l'obtenir en brûlant les

quantités appropriées de gaz dans la centrale électrique et dans la chaudière. Ainsi, la nouvelle solution standard permet d'obtenir n'importe lequel des rendements électriques et calorifiques situés sur la ligne A-B, en utilisant deux installations séparées pour produire de l'électricité et de la chaleur.

Pour donner une perspective historique, le diagramme montre également l'ancienne méthode de chauffage (une chaudière ordinaire sans condensation, avec un rendement de 79 %) et la solution standard qu'on utilisait il y a quelques décennies pour produire de l'électricité (une centrale au charbon avec un rendement électrique d'environ 37 %).

La cogénération

Ensuite, nous ajoutons sur le diagramme les systèmes de cogénération. Ces systèmes transforment l'énergie chimique en électricité et en chaleur.



Chacun des ronds pleins indique les performances moyennes réelles des systèmes de cogénération au Royaume-Uni, regroupés par type. Les ronds évidés marqués « CT » mentionnent les performances de systèmes idéaux de cogénération cités par le Carbon Trust, les ronds évidés marqués « Nimbus » sont les spécifications des produits d'un fabricant. Les ronds marqués « ct » sont les performances réelles données par le Carbon Trust pour deux systèmes installés (à l'hôpital Freeman et à Elizabeth House).

Ce qu'il faut remarquer sur ce diagramme, c'est que les rendements électriques des systèmes de cogénération sont beaucoup plus faibles que le rendement de 49 % des centrales à gaz produisant uniquement de l'électricité. Ainsi la chaleur n'est pas un « produit dérivé gratuit ». Accroître la production de chaleur se répercute sur la production d'électricité.

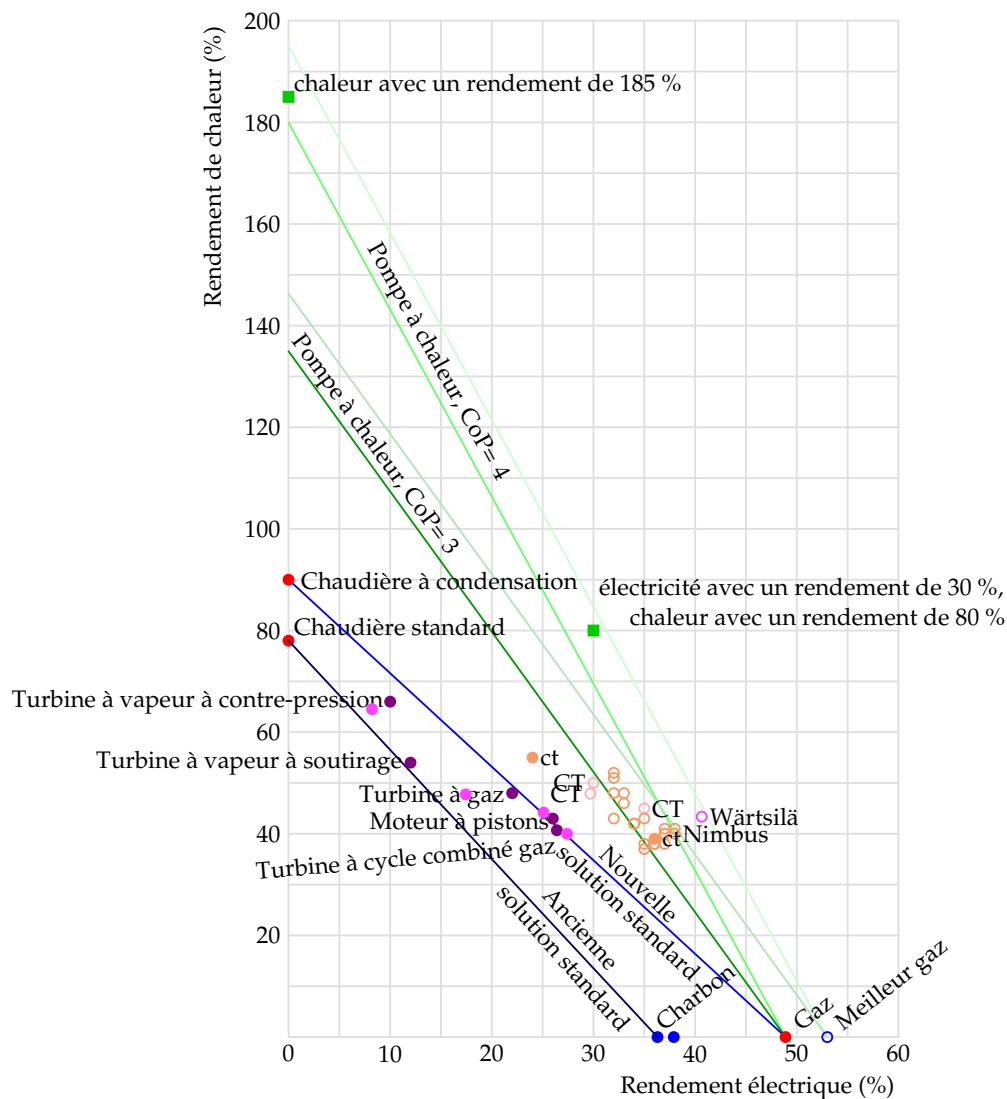
C'est une pratique courante d'amalgamer les deux chiffres (les rendements de la production d'électricité et de chaleur) en un seul « rendement total » — par exemple, les turbines à vapeur à contre-pression fournissant 10 % d'électricité et 66 % de chaleur seraient désignées comme ayant « 76 % de rendement » — mais je pense que c'est un résumé trompeur de leur performance. Après tout, selon ce mode de calcul, une chaudière à condensation avec 90 % de rendement serait « plus efficace » que n'importe quel système de cogénération ! Mais le fait est que l'énergie électrique est plus précieuse que la chaleur.

Bon nombre de ronds représentant la cogénération dans ce diagramme ont des performances supérieures à « l'ancienne méthode standard » (obtenant de l'électricité à partir du charbon et de la chaleur à partir d'une chaudière). Et les systèmes de cogénération sont légèrement mieux placés que « la nouvelle méthode standard » (obtenant de l'électricité à partir du gaz, et de la chaleur à partir de chaudières à condensation). Et à leur tour, les systèmes de cogénération idéaux sont légèrement mieux placés que « la nouvelle méthode standard » (obtenant de l'électricité à partir du gaz, et de la chaleur à partir de chaudières à condensation). Mais nous devons garder à l'esprit que cette légère supériorité a quelques inconvénients — un système de cogénération ne fournit de la chaleur qu'aux endroits où il est installé, tandis que les chaudières à condensation peuvent être implantées à n'importe quel endroit où se trouve une conduite de gaz. Comparés à la nouvelle méthode standard, les systèmes de cogénération ne sont pas aussi flexibles dans le mélange de la production de chaleur et d'électricité. Un système de cogénération fonctionnera de manière optimale quand il délivrera un certain mélange d'électricité et de chaleur. Ce manque de flexibilité rend parfois le système peu efficace, par exemple quand le système produit plus de chaleur que voulue. De la même manière, dans une maison normale, la demande d'électricité est en général sous forme de pics relativement courts, peu corrélés avec la demande de chauffage. Un dernier problème avec certains systèmes de micro-cogénération : en cas de surplus d'électricité produite, ils ne peuvent pas toujours la réinjecter dans le réseau de la meilleure façon possible.

Enfin, nous ajoutons au schéma les pompes à chaleur utilisant l'électricité du réseau pour transférer la chaleur de l'extérieur vers l'intérieur des bâtiments.

Les lignes vertes indiquent les combinaisons d'électricité et de chaleur que vous pouvez obtenir en supposant : que les pompes à chaleur ont un coefficient de performance de 3 ou 4 ; que l'électricité supplémentaire nécessaire pour les pompes à chaleur est générée par une centrale à gaz normale ou par une centrale à gaz de haut de gamme ; et en admettant une perte de 8 % dans le réseau national d'électricité (entre la centrale et les bâtiments chauffés par les pompes à chaleur). La centrale à gaz haut de gamme a un rendement de 53 %, en supposant qu'elle fonctionne de façon optimale. (J'imagine que Carbon Trust et Nimbus ont fait une hypothèse

similaire pour les performances des systèmes de cogénération indiqués sur ce diagramme.) Dans l'avenir, les pompes à chaleur seront probablement encore meilleures que je le suppose ici. Au Japon, grâce à une législation favorisant l'amélioration de l'efficacité, les pompes à chaleur sont aujourd'hui disponibles avec un coefficient de performance de 4,9.



Notez que les pompes à chaleur offrent un système qui peut avoir « un rendement supérieur à 100 % ». Par exemple la « meilleure centrale à gaz » alimentant des pompes à chaleur peut délivrer une combinaison de 30 % de rendement pour l'électricité et 80 % pour la chaleur, soit un « rendement total » de 110 %. Aucun système bi-énergie ne pourra jamais égaler cette performance.

Permettez-moi d'apporter une précision. Le rendement des pompes à chaleur est supérieur à celui des chaudières à condensation, même si les pompes à chaleur sont alimentées par l'électricité produite à partir d'une centrale brûlant du gaz naturel. Si vous voulez chauffer beaucoup de bâtiments en utilisant le gaz naturel, vous pourriez installer des chaudières à condensation, qui ont un « rendement de 90 % », ou vous pourriez envoyer le même gaz à une nouvelle centrale au gaz produisant de l'électricité et installer dans tous les bâtiments des pompes à chaleur alimentées en électricité ; le rendement de la seconde solution serait situé entre 140 % et 185 %. Il n'est pas nécessaire de creuser de gros trous dans le jardin et d'installer un chauffage au sol pour tirer les avantages des pompes à chaleur ; la meilleure pompe à chaleur air-eau (qui n'exige qu'un petit coffret extérieur grand comme un climatiseur) peut fournir de l'eau chaude dans des radiateurs ordinaires avec un coefficient de performance supérieur à 3. La pompe à chaleur air-air de la figure 21.11 (page 175) fournit directement de l'air chaud dans un bureau.

J'en conclus que la cogénération n'est probablement pas le meilleur moyen pour chauffer les bâtiments et produire de l'électricité en utilisant le gaz naturel — même si cela semble une bonne idée — lorsque des pompes à chaleur air-air ou géothermiques peuvent être installées dans des bâtiments. La solution utilisant des pompes à chaleur a aussi d'autres avantages qui doivent être soulignés : les pompes à chaleur peuvent être installées dans tous les bâtiments raccordés au réseau électrique, et leur alimentation électrique peut provenir de sources différentes, de sorte qu'elles peuvent continuer à fonctionner lorsque le prix du gaz s'envole ou que le gaz est épuisé ; les pompes à chaleur sont flexibles d'utilisation : elles peuvent être démarrées ou arrêtées à la demande des occupants du bâtiment.

Je tiens à souligner que cette comparaison critique ne signifie pas que la cogénération est toujours une mauvaise idée. Ce que je compare ici, ce sont les méthodes de chauffage de bâtiments ordinaires, qui n'exigent seulement que de la chaleur à basse température. La cogénération peut également être utilisée pour produire de la chaleur à haute température (à 200 °C, par exemple) pour des utilisations industrielles. Dans ces installations, les pompes à chaleur ne sont pas susceptibles d'être aussi avantageuses car leur coefficient de performance sera inférieur.

Les limites à la croissance (des pompes à chaleur)

Parce que la température du sol, à quelques mètres sous terre, reste paresseusement à près de 11 °C été comme hiver, et que la température de l'air, en plein hiver, peut être 10 ou 15 °C plus basse que celle du sol, le sol est, pour une pompe à chaleur, un meilleur endroit que l'air pour y puiser de la chaleur, du moins en théorie. Les spécialistes en pompe à chaleur encouragent donc le choix d'une source géothermique plutôt qu'une source

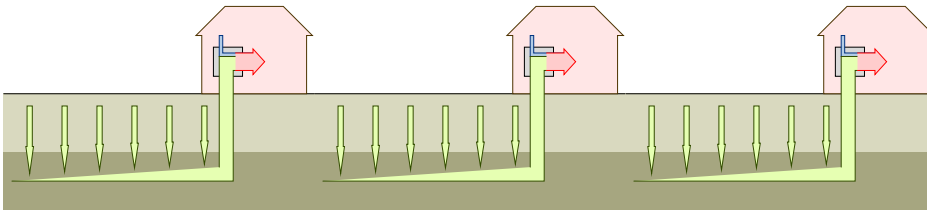


FIGURE 21.12. Jusqu'à quel point peut-on rapprocher les pompes à chaleur géothermiques les unes des autres ?

d'air lorsque cela est possible. (Les pompes à chaleur fonctionnent moins bien lorsque la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur est grande.)

Cependant, le sol n'est pas une source inépuisable de chaleur. La chaleur doit venir de quelque part, et la terre est un conducteur thermique assez mauvais. Si on absorbe la chaleur du sol trop rapidement, la terre deviendra aussi froide que de la glace, et les avantages de la pompe à chaleur géothermique seront réduits.

En Grande-Bretagne, l'objectif principal des pompes à chaleur est de fournir de la chaleur en hiver. La source première de cette chaleur est le soleil, qui restitue la chaleur dans le sol par rayonnement direct et par conduction dans l'air. Le rythme auquel la chaleur est prélevée du sol doit satisfaire deux contraintes : il ne doit pas provoquer une chute trop importante de la température du sol pendant l'hiver et la chaleur prise en hiver doit être réapprovisionnée durant l'été. S'il y a un risque que le réchauffement *naturel* en été ne compense pas la chaleur extraite en hiver, alors le réapprovisionnement doit être conduit *de manière active* — par exemple en faisant fonctionner le système en sens inverse en été, et en renvoyant la chaleur dans le sol (et en produisant ainsi de la climatisation).

Ajoutons quelques chiffres dans cette discussion. De quelle surface de terrain a besoin une pompe à chaleur géothermique ? Supposons que nous ayons un quartier avec une assez forte densité de population — par exemple 6 200 personnes par km^2 (160 m^2 par personne), soit la densité courante d'une banlieue anglaise. *Tout le monde* peut-il utiliser une pompe à chaleur géothermique, sans une reconstitution active l'été ? Le calcul du chapitre E (page 356) tente d'y apporter une réponse, et conclut que *non* : si on voulait que tout le monde dans le quartier puisse être en mesure de tirer du sol un flux de chaleur d'environ 48 kWh/j par personne (mon estimation de nos besoins de chaleur en hiver), on finirait par faire geler le sol en hiver. Pour éviter un refroidissement excessif du sol, le prélèvement doit être inférieur à 12 kWh/j par personne. Ainsi, si on passe aux pompes à chaleur géothermiques, il nous faut envisager d'inclure dans notre étude une réinjection substantielle de chaleur en été, de manière à compenser la chaleur extraite du sol en hiver. Cette chaleur réinjectée l'été pourrait utiliser la chaleur provenant de l'air conditionné, ou de panneaux solaires à eau chaude situés sur les toits. (La communauté canadienne « Drake Landing Solar Community » utilise le stockage de chaleur solaire d'été

dans le sol pour une utilisation ultérieure en hiver [www.dlsc.ca].) A défaut, nous pourrions nous attendre à devoir utiliser aussi les pompes à chaleur air-air, nous serions alors en mesure d'obtenir toute la chaleur que nous voulons — aussi longtemps que nous aurions l'électricité nécessaire au transfert de cette chaleur. Au Royaume-Uni, la température de l'air ne descend pas beaucoup en dessous de zéro ; aussi les préoccupations au sujet de la mauvaise performance hivernale des pompes à chaleur air-air peuvent concerner l'Amérique du Nord ou la Scandinavie, mais ne s'appliquent pas vraiment en Grande-Bretagne.

Ma conclusion est la suivante : peut-on réduire l'énergie que nous consommons pour le chauffage ? Oui. Peut-on en même temps s'affranchir des combustibles fossiles ? Oui. En remplaçant tous nos appareils de chauffage à combustibles fossiles par des pompes à chaleur électriques, sans oublier de faire tout ce qui est facile à réaliser — comme l'isolation des bâtiments et une meilleure utilisation des thermostats, par exemple — on peut réduire la quantité d'énergie qui nous est nécessaire à seulement un quart des niveaux actuels. Et même si l'électricité supplémentaire provient de centrales à gaz, cela resterait encore une bien meilleure façon de se chauffer que celle utilisée aujourd'hui, qui brûle directement du gaz. Les pompes à chaleur sont une solution à l'épreuve de l'avenir, en nous permettant de chauffer les bâtiments efficacement à partir de n'importe quelle source d'électricité.

Certains opposants systématiques objecteront que le coefficient de performance des pompes à chaleur air-air n'est pas bon — seulement de 2 ou 3. Mais leurs informations commencent sérieusement à dater. Si on fait bien attention à acheter des pompes à chaleur dernier cri, on peut faire beaucoup mieux. Le gouvernement japonais a légiféré depuis une décennie pour accroître l'efficacité énergétique, ce qui a considérablement amélioré les performances des climatiseurs ; grâce à cette action, il existe maintenant des pompes à chaleur à air ayant un coefficient de performance de 4,9 ; ces pompes à chaleur peuvent produire de l'eau chaude ou de l'air chaud.

Une autre objection faite aux pompes à chaleur est celle-ci : « oh, mais on ne va pas laisser les gens s'équiper de pompes à chaleur, sinon ils vont les utiliser pour avoir la climatisation en été ! » Allons ! Comme tout le monde, j'ai horreur de l'utilisation abusive de la climatisation, mais ces pompes à chaleur sont quatre fois plus efficaces que toute autre méthode de chauffage en hiver ! Indiquez-moi un meilleur choix. Les granulés de bois ? Bien sûr, un certain nombre de consommateurs peuvent en brûler. Mais il n'y a pas assez de bois pour que tout le monde puisse le faire. Pour les gens qui habitent dans la forêt, il y a du bois ; pour les autres, il y a des pompes à chaleur.

Notes et bibliographie

superficie par personne (m ²)	
Bangalore	37
Manhattan	39
Paris	40
Chelsea	66
Tokyo	72
Moscou	97
Taipei	104
La Hague	152
San Francisco	156
Singapour	156
Cambridge (USA)	164
Sydney	174
Portsmouth	213

TABEAU 21.13. Quelques densités de population urbaines.



169 *L'isolation des murs creux réduit de près d'un quart les pertes de chaleur dans une maison normale.* Eden et Bending (1985).

171 *La température intérieure moyenne dans les maisons britanniques en 1970 était de 13 °C !* Source : Department of Trade and Industry (2002a, para 3.11)

173 *La Grande-Bretagne est en retard en matière de chauffage urbain et de cogénération.* La chaleur rejetée par les centrales électriques du Royaume-Uni pourrait répondre aux besoins de chauffage du pays tout entier (Wood, 1985). En 1985 au Danemark, les systèmes de chauffage urbains fournissaient 42 % du chauffage, la chaleur étant transmise à 20 km ou plus par de l'eau sous pression. En Allemagne de l'Ouest, en 1985, 4 millions de logements recevait chacun 7 kW du chauffage urbain. Deux tiers de la chaleur fournie provenaient des centrales électriques. À Vasteras, en Suède, en 1985, 98 % de la chaleur de la ville était fournie par les centrales électriques.

175 *Les pompes à chaleur sont à peu près quatre fois plus efficaces qu'un radiateur électrique standard.* Voir www.gsnp.org.uk.

Certaines pompes à chaleur disponibles au Royaume-Uni ont déjà un coefficient de performance supérieur à 4,0 [yok2nw]. En effet, il y a une subvention du gouvernement pour les pompes à chaleur eau-eau et eau-air, qui ne s'applique qu'aux pompes dont le coefficient de performance est supérieur à 4,4 [2dtx8z].

Des pompes à chaleur géothermiques sont disponibles dans le commerce avec un coefficient de performance de 5,4 pour le refroidissement, et 4,9 pour le chauffage [2fd8ar].

182 *Des pompes à chaleur à air avec un coefficient de performance de 4,9...* selon HPTCJ (2007) des pompes à chaleur avec un coefficient de performance de 6,6 sont disponibles au Japon depuis 2006. Les coefficients de performance des pompes à chaleur au Japon sont passés de 3 à 6 en une décennie grâce à la réglementation gouvernementale. HPTCJ (2007) décrit une pompe à chaleur air-eau appelée Eco Cute, qui a un coefficient de performance de 4,9. Eco Cute est arrivée sur le marché en 2001. www.ecosystem-japan.com.

Pour en savoir plus sur les pompes à chaleur : European Heat Pump Network ehpn.fiz-karlsruhe.de/en/, www.kensaengineering.com, www.heatking.co.uk, www.iceenergy.co.uk.

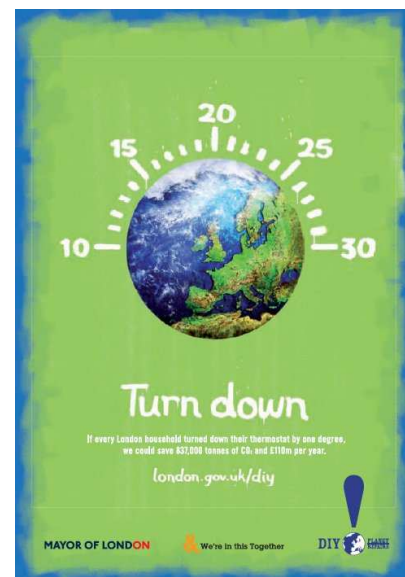


FIGURE 21.14. Publicité faisant partie de la campagne « Do-It-Yourself planet repairs » lancée en 2007 par le maire de Londres, Ken Livingston. Le texte dit : « **Baissez** la température. Si chaque foyer londonien baissait son thermostat d'un degré, on pourrait économiser 837 000 tonnes de CO₂ et 130 millions d'euros par an. » [london.gov.uk/diy] Exprimé sous la forme d'économies par personne, cela fait 0,12 tonne de CO₂ par personne, c'est-à-dire environ 1 % des émissions totales d'une personne (11 tonnes). C'est donc *effectivement* un bon conseil. Bravo, Ken !

22 Utiliser l'électricité de manière plus efficace

Peut-on réduire sa consommation d'électricité ? Oui : éteindre les appareils électriques qu'on n'utilise pas est un moyen facile pour faire une grosse différence. Utiliser des ampoules basse consommation vous fera aussi économiser de l'électricité.

Nous avons déjà examiné les appareils électriques dans le chapitre 11. Certains d'entre eux ont une consommation électrique négligeable, mais d'autres sont étonnamment goinfres. L'imprimante laser par exemple, qui reste plantée là sans rien faire, siffle 17 W — presque 0,5 kWh par jour ! Un de mes amis a acheté une lampe chez IKEA. Son affreuse prise secteur (figure 22.1) engloutit 10 W (0,25 kWh par jour), que la lampe soit allumée ou non. Si vous y ajoutez quelques chaînes hi-fi, des lecteurs DVD, des modems ADSL et des accessoires sans fil, vous pourriez même découvrir que la moitié de votre consommation électrique peut être économisée.

Selon l'Agence Internationale de l'Énergie, la consommation de puissance des appareils électriques en mode veille représente environ 8 % de la demande d'électricité résidentielle. En Grande-Bretagne et en France, la puissance moyenne des appareils en veille est d'environ 0,75 kWh/j par foyer. Le problème, ce n'est pas la veille en elle-même : c'est la manière indigne dont ces systèmes de veille sont fabriqués. Il est tout à fait possible de faire des systèmes de veille qui se contentent de moins de 0,01 W. Mais les fabricants, pour s'économiser quelques centimes de coûts de fabrication, laissent le consommateur avec un surcoût annuel de nombre d'euros.



FIGURE 22.1. Une affreuse prise électrique de lampe de chez IKEA — elle consomme près de 10 W même quand la lampe est éteinte !

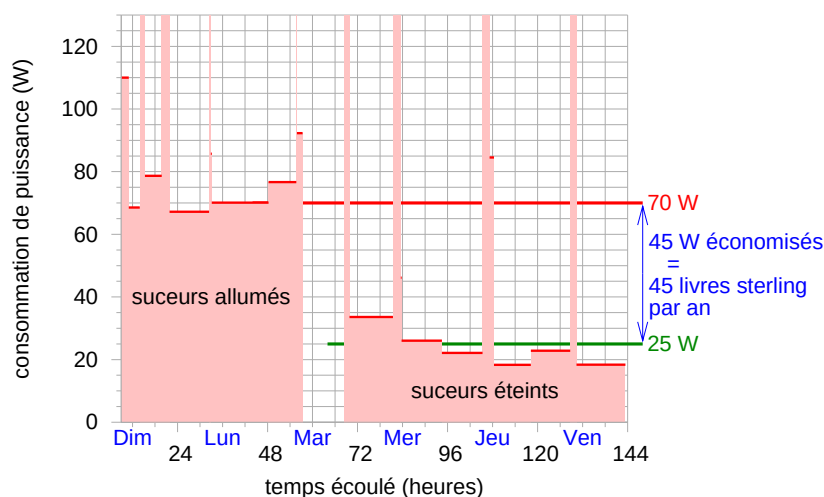


FIGURE 22.2. Économiser en éteignant. J'ai mesuré les économies faites en débranchant les vampires électriques pendant une semaine alors que j'étais au travail durant l'essentiel de la journée, de sorte qu'à la fois les jours et les nuits étaient presque dénuées d'activité utile, à part le réfrigérateur. Les petites pointes de consommation sont dues au micro-ondes, au grille-pain, à la machine à laver ou à l'aspirateur. Le mardi, j'ai débranché la plupart de mes vampires : deux chaînes hi-fi, un lecteur DVD, un modem ADSL, un routeur wi-fi et un répondeur téléphonique. La ligne rouge montre la consommation « sans personne à la maison » avant, et la ligne verte « sans personne à la maison » après. La consommation a baissé de 45 W, soit 1,1 kWh par jour.

Jouons à éliminer les vampires

La figure 22.2 montre une petite expérience que j'ai conduite chez moi. Tout d'abord, pendant deux jours, j'ai mesuré ma consommation de puissance électrique quand j'étais sorti ou en train de dormir. Ensuite, j'ai débranché tous les appareils que je laisse normalement allumés, et j'ai refait les mesures pendant trois jours de plus. J'ai découvert que la puissance économisée était de 45 W — cela fait presque 45 € tous les ans, avec une électricité à 11 centimes d'euro le kWh.

Depuis que j'ai commencé à faire attention à ma consommation d'électricité en regardant régulièrement mon compteur, ma consommation totale d'électricité a été divisée par deux (figure 22.3). J'ai consolidé ces économies en prenant pour habitude de regarder mon compteur chaque semaine, pour vérifier que les vampires suceurs d'électricité respectent leur condamnation à être bannis. Si ce petit tour de magie pouvait être répété dans tous les foyers et les lieux de travail, nous pourrions faire des économies substantielles. Aussi, quelques-uns d'entre nous à Cambridge, nous nous sommes donc rassemblés pour faire un site Web dont le but est de rendre la lecture régulière des compteurs amusante et instructive. Le site ReadYourMeter.org vise à aider les gens à conduire des expériences semblables à celle que j'ai menée, à rendre compréhensibles les résultats qu'ils obtiennent, et avoir le sentiment réconfortant de dépenser moins.

J'espère vraiment que ce genre d'activité de mesure intelligente fera une différence. Dans la Grande-Bretagne schématisée de 2050, j'ai cependant supposé que toutes ces économies d'électricité seraient mangées par le miracle de la croissance. La croissance est un des dogmes de notre société : les gens vont être de plus en plus riches, et ainsi pouvoir jouer avec de plus en plus de gadgets. La demande en jeux sur ordinateurs toujours plus beaux, réalistes et complexes oblige à disposer d'ordinateurs toujours plus gourmands en puissance. On trouvait les ordinateurs de la décennie précédente plutôt bien faits, mais maintenant on les trouve inutilisables, et il faut les remplacer par des machines plus rapides et qui chauffent plus.

Notes et bibliographie

Page n°

184 *La consommation de puissance des appareils électriques en mode veille représente environ 8 % de la demande d'électricité résidentielle.* Source : International Energy Agency (2001).

Pour en savoir plus sur les politiques de mise en veille, lire :

www.iea.org/textbase/subjectqueries/standby.asp.

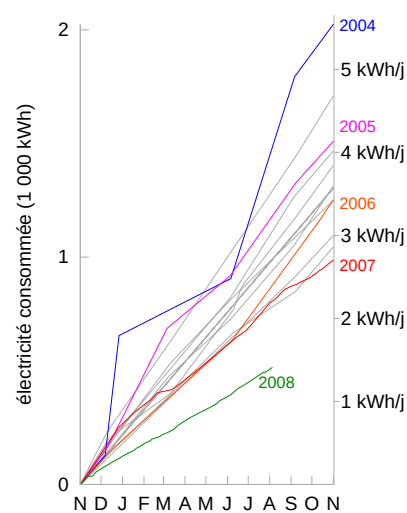


FIGURE 22.3. Ma consommation électrique domestique cumulée, en kWh, année par année, de 1993 à 2008. Les lignes grises indiquent les années 1993 à 2003 (pour une meilleure lisibilité, je n'ai pas indiqué l'année). Les lignes colorées indiquent les années 2004 et suivantes. L'échelle de droite montre le rythme moyen de consommation d'énergie, en kWh par jour. Le jeu de chasse aux vampires a démarré le 2 octobre 2007. En combinant éradication des vampires et installation d'ampoules basse-consommation, j'ai pu réduire ma consommation électrique de 4 kWh/j à 2 kWh/j.

23 Des combustibles fossiles durables ?

Les combustibles fossiles resteront une part importante de notre mix énergétique durant les décennies à venir : c'est une réalité incontournable.

Porte-parole du gouvernement britannique, avril 2008

Notre condition actuelle de croissance heureuse ne durera qu'un temps limité.

William Stanley Jevons, 1865

Dans les trois chapitres précédents, nous avons exploré les principales technologies et les changements de style de vie afin de réduire notre consommation d'énergie. Nous sommes arrivés à la conclusion que l'on pouvait diviser par deux la dépense énergétique liée aux transports (tout en la dé-fossilisant) en nous convertissant aux véhicules électriques. Nous avons trouvé que l'on pouvait réduire encore plus la consommation énergétique de chauffage (et la dé-fossiliser) en améliorant l'isolation de tous les bâtiments et en utilisant des pompes à chaleur électriques plutôt que des combustibles fossiles. Donc oui, nous pouvons réduire notre consommation. Cependant, faire correspondre cette consommation, même réduite, avec les ressources renouvelables propres à la Grande-Bretagne semble un défi colossal (figure 18.7, page 130). Il est temps de débattre des options non renouvelables pour la production d'énergie.

Prenez les réserves connues de combustibles fossiles, qui sont, pour une écrasante part, constituées de charbon : 1 600 Gt de charbon. Partagez-les de manière égale entre 6 milliards de personnes, et brûlez-les « de manière durable ». Attendez, ça veut dire quoi, utiliser « de manière durable » une ressource qui n'existe qu'en quantité finie ? Voici la définition arbitraire que je vais utiliser : le rythme de combustion est dit « durable » si les ressources peuvent durer **1 000 ans**. Une tonne de charbon fournit 8 000 kWh d'énergie chimique, donc 1 600 Gt de charbon partagées entre 6 milliards de personnes sur 1 000 ans, cela fait une puissance de **6 kWh par jour et par personne**. Une centrale à charbon standard convertirait cette puissance en électricité avec une efficacité d'environ 37 % — cela se traduit par environ **2,2 kWh(e) par jour et par personne**. Cependant, si l'on se soucie du climat, alors on n'utilisera vraisemblablement pas une centrale à charbon standard. On fera plutôt dans le « charbon propre », également connu sous l'expression « charbon avec capture et séquestration du carbone » — une technologie encore à peine mise en œuvre pour l'instant, et qui aspire l'essentiel du dioxyde de carbone des gaz de cheminée pour l'expédier dans un trou dans le sol. Ce nettoyage des émissions d'une centrale a un coût énergétique significatif — cela réduirait la quantité d'électricité fournie d'environ 25 %. Une exploitation « durable » des réserves de charbon connues ne fournirait donc qu'environ **1,6 kWh(e) par jour et par personne**.



FIGURE 23.1. Charbon en cours de livraison à la centrale de Kingsnorth (d'une capacité de 1 940 MW) en 2005. Photos de Ian Boyle www.simplonpc.co.uk.

Charbon : 6

FIGURE 23.2. « Combustibles fossiles durables. »

On peut comparer ce rythme « durable » de combustion du charbon — 1,6 Gt par an — au rythme actuel de consommation de charbon : 6,3 Gt par an — et il augmente toujours.

Quid du seul Royaume-Uni ? Les réserves restantes de charbon en Grande-Bretagne sont estimées à 7 Gt. Bien. Partageons ces 7 Gt entre 60 millions de personnes : on trouve 100 tonnes par personne. Et si l'on veut une solution pour 1 000 ans, cela correspond à **2,5 kWh par jour et par personne**. Et dans une centrale qui capture et séquestre le carbone, cette approche durable avec du charbon britannique offrirait **0,7 kWh(e) par jour et par personne**.

Notre conclusion est claire :

Le charbon propre ne peut être qu'un pis-aller temporaire.

Si l'on décide de développer la technologie du « charbon propre » pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, il nous faut être attentif, pendant que l'on s'auto-congratule, à faire nos comptes correctement et honnêtement. Le processus de combustion du charbon libère des gaz à effet de serre au niveau de la centrale, mais aussi depuis la mine. L'extraction de charbon dans les mines a tendance à libérer du méthane, du monoxyde de carbone et du dioxyde de carbone, à la fois directement des veines de charbon au moment où on les expose à l'air, et, par la suite, des schistes et des limons que l'on rejette sous forme de stériles. Pour une centrale à charbon ordinaire, ces émissions minières font grimper l'empreinte de gaz à effet de serre d'environ 2 % ; ces émissions auront donc un impact significatif sur le bilan d'une centrale « propre ». Un problème comptable similaire se pose avec le gaz naturel : si, disons, 5 % du gaz naturel fuit pendant son transport du puits à la centrale, cette pollution accidentelle au méthane est équivalente (en effet de serre) à un supplément de 40 % du dioxyde de carbone émis par la centrale.

Nouvelles technologies charbonnières

La société directcarbon.com, basée à Stanford, développe en ce moment la *pile à combustible à charbon direct*, qui convertit le combustible et l'air directement en électricité et en CO₂, sans avoir besoin d'eau ou de turbine à vapeur. Ils prétendent que cette technique de génération d'électricité à partir du charbon a un rendement deux fois meilleur que celui d'une centrale à charbon standard.

Et si on ne change rien, ça va durer combien de temps ?

L'économiste Jevons a fait un calcul simple en 1865. Les gens débattaient du temps que durerait le charbon britannique. Ils avaient tendance à répondre à cette question en divisant la quantité estimée de charbon restant



FIGURE 23.3. Un tractopelle broutant de très vieilles feuilles. Photo de Peter Gunn.

par le rythme de sa consommation, et obtenaient des réponses du genre « 1 000 ans ». Mais, remarqua Jevons, la consommation n'est *pas* constante. Elle a doublé tous les 20 ans, et le « progrès » fera qu'elle continuera sur sa lancée. Donc les « réserves divisées par le rythme de consommation » donne une réponse fausse.

Au lieu de cela, Jevons a extrapolé la croissance exponentielle de la consommation, calculant le moment à partir duquel la quantité totale consommée dépasserait les réserves estimées. Le délai calculé était beaucoup plus court. Jevons ne s'imaginait pas que la consommation continuerait toujours à croître au même rythme ; simplement, il mettait en évidence le fait que cette croissance ne pourrait pas durer éternellement. Son calcul faisait, à l'intention de son lectorat britannique, une estimation des inévitables limites à leur croissance, et du court laps de temps restant avant que ces limites ne deviennent une évidence. Jevons fit la prédiction osée que la fin du « progrès » britannique surviendrait dans les 100 années suivant 1865. Et Jevons ne s'est pas trompé. La production de charbon en Grande-Bretagne a atteint un pic en 1910, et en 1965, la Grande-Bretagne n'était plus une superpuissance mondiale.

Refaisons son calcul pour le monde entier. En 2006, le rythme de consommation de charbon était de 6,3 Gt par an. En comparant ce chiffre aux réserves connues de 1 600 Gt de charbon, on entend souvent dire « il reste **250 ans** de charbon ». Mais si l'on part du principe que le « *business as usual* » implique une consommation croissante et non constante, on obtient une réponse différente. Si la croissance de la consommation de charbon devait continuer à 2 % par an (ce qui correspond à peu près aux données sur la période 1930–2000), alors tout le charbon aura disparu en 2096. Si le rythme de croissance se maintient à 3,4 % par an (le rythme de croissance que le monde a connu durant la dernière décennie), la fin du *business as usual* est pour avant 2072. Pas **250 ans** : **60 ans** !

Si Jevons vivait encore aujourd'hui, je suis sûr qu'il prédirait formellement qu'à moins de choisir, par nous-mêmes, une autre voie que le *business as usual*, nous allons connaître, autour de 2050 ou 2060, la fin de notre condition de croissance heureuse.



Notes et bibliographie

Page n°

- 186 *1 000 ans — ma définition arbitraire de « durable »* A titre de précédent à ce type de choix, Hansen et al. (2007) assimilent « plus de 500 ans » à « pour toujours ».
- *1 tonne équivalent charbon = 29,3 GJ = 8 000 kWh* d'énergie chimique. Ce chiffre ne prend pas en compte les coûts énergétiques de l'exploitation minière, du transport et de la séquestration de carbone.
 - *Capture et séquestration du carbone* (CSC). Il y a plusieurs technologies de CSC. Aspirer le CO₂ à partir des gaz de cheminée est l'une d'entre elles ; d'autres gazéifient le charbon et séparent le CO₂ avant combustion. Voir Metz et al. (2005). Le premier prototype de centrale à charbon avec CSC a été mis en service le 9 septembre 2008 par la société suédoise Vattenfall [5kpjk8].
- 187 *Charbon en Grande-Bretagne*. En décembre 2005, les réserves et ressources des *mines existantes* étaient estimées à 350 millions de tonnes. En novembre 2005, les réserves potentielles à ciel ouvert étaient estimées à 620 millions de tonnes, et le potentiel de gazéification du charbon en sous-sol à au moins 7 milliards de tonnes. [yebuk8]
- *L'extraction de charbon dans les mines a tendance à libérer des gaz à effet de serre*. Pour plus d'informations au sujet de la libération de méthane par l'exploitation minière du charbon, voir www.epa.gov/cmop/, Jackson et Kershaw (1996), Thakur et al. (1996). Les émissions mondiales de méthane dues à l'extraction du charbon sont d'environ 400 millions de tonnes équivalent CO₂ par an. Cela correspond à environ 2 % des émissions de gaz à effet de serre liées à la combustion du charbon.
Le contenu moyen en méthane des veines de charbon britanniques est de 4,7 m³ par tonne de charbon (Jackson et Kershaw, 1996) ; ce méthane, s'il est relâché dans l'atmosphère, a un potentiel de réchauffement climatique d'environ 5 % celui du CO₂ obtenu en brûlant le charbon.
- 187 *Si 5 % du gaz naturel fuit, c'est équivalent à un supplément de 40 % en dioxyde de carbone*. La pollution accidentelle au méthane est près de huit fois plus importante en termes d'effet de serre planétaire, que la pollution au CO₂ qui surviendrait si on brûlait le méthane ; 8 fois, et non les « 23 fois » standard, parce que les « 23 fois » sont le ratio de réchauffement entre masses égales de méthane et de CO₂. Chaque tonne de CH₄ se transforme en 2,75 tonnes de CO₂ si on la brûle ; si elle fuit, elle est équivalente à 23 tonnes de CO₂. Et 23/2,75, cela fait 8,4.

Pour en savoir plus : World Energy Council [yhxf8b]

Pour en savoir plus sur la gazéification du charbon en sous-sol : [e2m9n]

24 Du nucléaire ?

Nous avons fait l'erreur de faire l'amalgame entre énergie nucléaire et armes nucléaires, comme si tout ce qui était nucléaire était mauvais. Je pense que c'est une erreur aussi grossière que de faire l'amalgame entre médecine nucléaire et armes nucléaires.

Patrick Moore,
ancien Directeur de Greenpeace International

L'énergie nucléaire existe sous deux formes. La *fission* nucléaire est celle que nous savons exploiter dans nos centrales électriques ; elle utilise l'uranium, un élément exceptionnellement lourd, comme combustible. La *fusion* nucléaire est une seconde forme, que nous ne savons pas encore exploiter dans des centrales ; elle utiliserait alors des éléments légers, en particulier l'hydrogène, comme combustible. Les réactions de fission fragmentent des noyaux lourds en noyaux de taille intermédiaire, ce qui libère de l'énergie. Les réactions de fusion joignent des noyaux légers en noyaux de taille intermédiaire, ce qui libère de l'énergie.

Les deux formes d'énergie nucléaire, fission et fusion, ont une caractéristique commune importante : l'énergie disponible par atome est environ un million de fois plus grande que l'énergie chimique par atome des combustibles classiques. Cela signifie que les quantités de combustible et de déchets qui doivent être gérés au niveau d'un réacteur nucléaire peuvent être jusqu'à un million de fois plus réduits que les quantités de combustible et de déchets d'une centrale équivalente qui brûle des combustibles fossiles.

Tâchons de ramener ces idées à l'échelle d'une personne. La quantité de combustibles fossiles consommée par « un Britannique moyen » est d'environ 16 kg par jour (4 kg de charbon, 4 kg de pétrole et 8 kg de gaz). Cela signifie que chaque jour qui passe, une quantité de combustibles fossiles plus lourde que 16 litres de lait est extraite d'un trou dans le sol, transportée, traitée et brûlée quelque part pour votre compte. L'addiction du « Britannique moyen » aux combustibles fossiles génère 11 tonnes de déchets par an sous forme de dioxyde de carbone ; cela fait 30 kg par jour. Dans le chapitre précédent, nous avons évoqué l'idée de capturer du dioxyde de carbone, de le comprimer sous une forme solide ou liquide, et de le transporter quelque part où on pourrait s'en débarrasser. Imaginons que chacun soit chargé de capturer et de traiter tous ses propres déchets de dioxyde de carbone. 30 kg de gaz carbonique par jour, ça fait un sacré sac à dos plein tous les jours — imaginez-vous avec 30 bouteilles de lait d'un litre sur le dos !

En revanche, dans un réacteur à fission standard, la quantité d'uranium naturel nécessaire pour fournir la même quantité d'énergie que 16 kg de combustibles fossiles, c'est 2 grammes ; et les déchets qui en résultent pèsent un quart de gramme. (Soit dit en passant, ces 2 g d'uranium, c'est

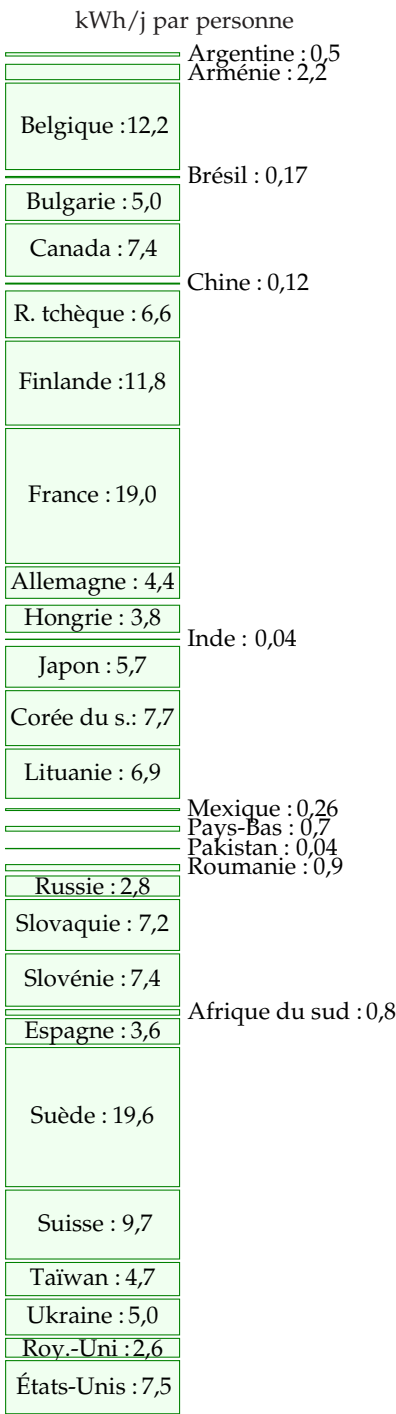


FIGURE 24.1. Électricité générée par habitant à partir de la fission nucléaire en 2007, en kWh par jour et par personne, dans chacun des pays utilisant l'énergie nucléaire.

plus qu'un millionième de 16 kg par jour, parce que les réacteurs actuels brûlent moins de 1 % de l'uranium). Pour produire 2 grammes d'uranium par jour, les mineurs, dans la mine d'uranium, devront extraire quelque chose comme 200 grammes de minerai par jour. Et la part de déchets nucléaires à haute activité d'un habitant français, pour *toute sa vie*, aura la taille d'une balle de golf.

Ainsi, les flux de matières qui entrent et sortent des réacteurs nucléaires sont petits, comparés au flux de combustibles fossiles. « *Small is beautiful* » disent les anglophones, mais le fait que le flux de déchets nucléaires soit petit ne signifie pas que ce n'est pas un problème : c'est juste un problème « joliment petit ».

De l'énergie « durable » à partir de la fission nucléaire

La figure 24.1 montre, pays par pays, la quantité d'électricité produite au niveau mondial par le nucléaire civil en 2007.

L'énergie nucléaire pourrait-elle être « durable » ? Si on laisse de côté un instant les problèmes classiques de la sécurité et de l'élimination des déchets, il reste la question-clé de savoir si l'humanité peut vivre de la fission nucléaire pendant plusieurs générations. Quelle quantité d'uranium et d'autres matières fissiles pourrait-on obtenir à l'échelle mondiale ? Est-ce qu'on n'a plus devant nous que pour quelques décennies d'uranium, ou est-ce qu'on en a encore pour des millénaires ?

Pour obtenir une estimation de la quantité de puissance nucléaire « durable », j'ai considéré la quantité totale d'uranium récupérable se trouvant dans le sol et l'eau de mer, que j'ai divisée équitablement entre 6 milliards de personnes, et je me suis demandé : « à quel rythme peut-on utiliser tout ça pour que ça puisse durer 1 000 ans » ?

Presque tout l'uranium récupérable se trouve non pas dans le sol, mais dans les océans : l'eau de mer contient 3,3 mg d'uranium par m³, ce qui fait un total de 4,5 milliards de tonnes à l'échelle de la planète. J'ai qualifié l'uranium des océans de « récupérable », mais ce n'est pas tout à fait exact — l'essentiel des eaux océaniques n'est pas accessible, et le mouvement de circulation océanique mondial (la « circulation thermohaline ») fait un tour autour du monde en à peu près 1 000 ans environ ; et personne n'a encore fait la démonstration que l'extraction de l'uranium de l'eau de mer était faisable à l'échelle industrielle. Nous allons donc faire des évaluations séparées pour deux cas : d'abord en ne considérant que l'uranium provenant des mines, puis en comptant aussi l'uranium des océans.

La quantité de minerai d'uranium présent dans le sol et extractible à un coût inférieur à \$130 par kilo d'uranium représente environ un millième de ces réserves. Si le prix de l'uranium dépassait \$130 le kg, l'exploitation des dépôts de phosphate à faible concentration en uranium deviendrait rentable. L'obtention d'uranium à partir des phosphates est tout à fait possible, et elle a déjà été réalisée aux États-Unis et en Belgique avant 1998.

million de tonnes d'uranium	
Australie	1,14
Kazakhstan	0,82
Canada	0,44
États-Unis	0,34
Afrique du sud	0,34
Namibie	0,28
Brésil	0,28
Fédération de Russie	0,17
Ouzbékistan	0,12
Total mondial (Réserves conventionnelles en sous-sol)	
	4,7
Dépôts de phosphate	22
Eau de mer	4 500

TABLEAU 24.2. Ressources connues et récupérables d'uranium. La partie supérieure du tableau montre les « ressources raisonnables assurées » et les « ressources inférées » extractibles à un coût inférieur à \$130 par kg d'uranium, au 1^{er} janvier 2005. Ce sont les estimations des ressources dans les zones où la prospection a eu lieu. Il y a aussi 1,3 millions de tonnes d'uranium appauvri accumulés dans des stocks, qui sont un sous-produit d'activités passées sur l'uranium.

Pour obtenir une estimation de la quantité d'uranium présent dans les mines, je vais faire la somme du minerai d'uranium conventionnel et de celui contenu dans les phosphates, ce qui nous donne une ressource totale de 27 millions de tonnes d'uranium (tableau 24.2).

Nous allons considérer deux manières d'utiliser l'uranium dans un réacteur : (a) la méthode utilisant le *cycle à stockage direct*, qui est de loin le cycle plus couramment utilisé dans le monde, et qui obtient principalement de la puissance à partir de ^{235}U (qui constitue à peine 0,7 % de l'uranium naturel), en laissant de côté le ^{238}U restant ; (b) la *surgénération*, qui requiert des réacteurs à neutrons rapides, ou surgénérateurs ; ces réacteurs, plus coûteux à construire, convertissent le ^{238}U en plutonium-239 fissile, ce qui permet d'obtenir environ 60 fois plus d'énergie à partir de l'uranium.

Les réacteurs à stockage direct, utilisant l'uranium tiré du sol

Une centrale nucléaire classique à stockage direct d'une puissance de **un gigawatt** consomme **162 tonnes d'uranium par an**. Les réserves connues et extractibles de minerai d'uranium, partagées entre 6 milliards de personnes, pourraient donc durer 1 000 ans si elles produisaient de la puissance d'origine nucléaire à un rythme de **0,55 kWh par jour et par personne**. Ce rythme durable correspond à la production de seulement 136 centrales nucléaires, c'est-à-dire la moitié de la production d'énergie nucléaire actuelle. Il est fort possible que ce chiffre sous-estime le potentiel de l'uranium, car comme nous ne connaissons pas encore de pénurie d'uranium, rien n'encourage la recherche de nouveaux filons. Presque aucune prospection n'a été entreprise depuis les années 1980. Il est donc possible que de nouvelles mines d'uranium puissent être découvertes à l'avenir. Et en effet, un article publié en 1980 estimait que la ressource à faible concentration d'uranium était plus de 1 000 fois plus importantes que les 27 millions de tonnes dont nous venons de faire l'hypothèse.

Notre consommation actuelle du minerai d'uranium dans des réacteurs à stockage direct est-elle durable ? C'est difficile à dire, tant est grande l'incertitude qui existe sur le résultat de la prospection future. Il est certain qu'au rythme de consommation actuel, des réacteurs à stockage direct pourraient continuer à fonctionner pendant des siècles. Mais si on voulait produire 40 fois plus d'énergie nucléaire dans le monde, pour se débarrasser des énergies fossiles et permettre une élévation des niveaux de vie, il y aurait lieu de s'inquiéter du fait que les réacteurs à stockage direct ne sont pas une technologie durable.

Les surgénérateurs, utilisant l'uranium tiré du sol

L'uranium peut être utilisé 60 fois plus efficacement dans des surgénérateurs, qui sont capables de consommer tout l'uranium naturel — à la



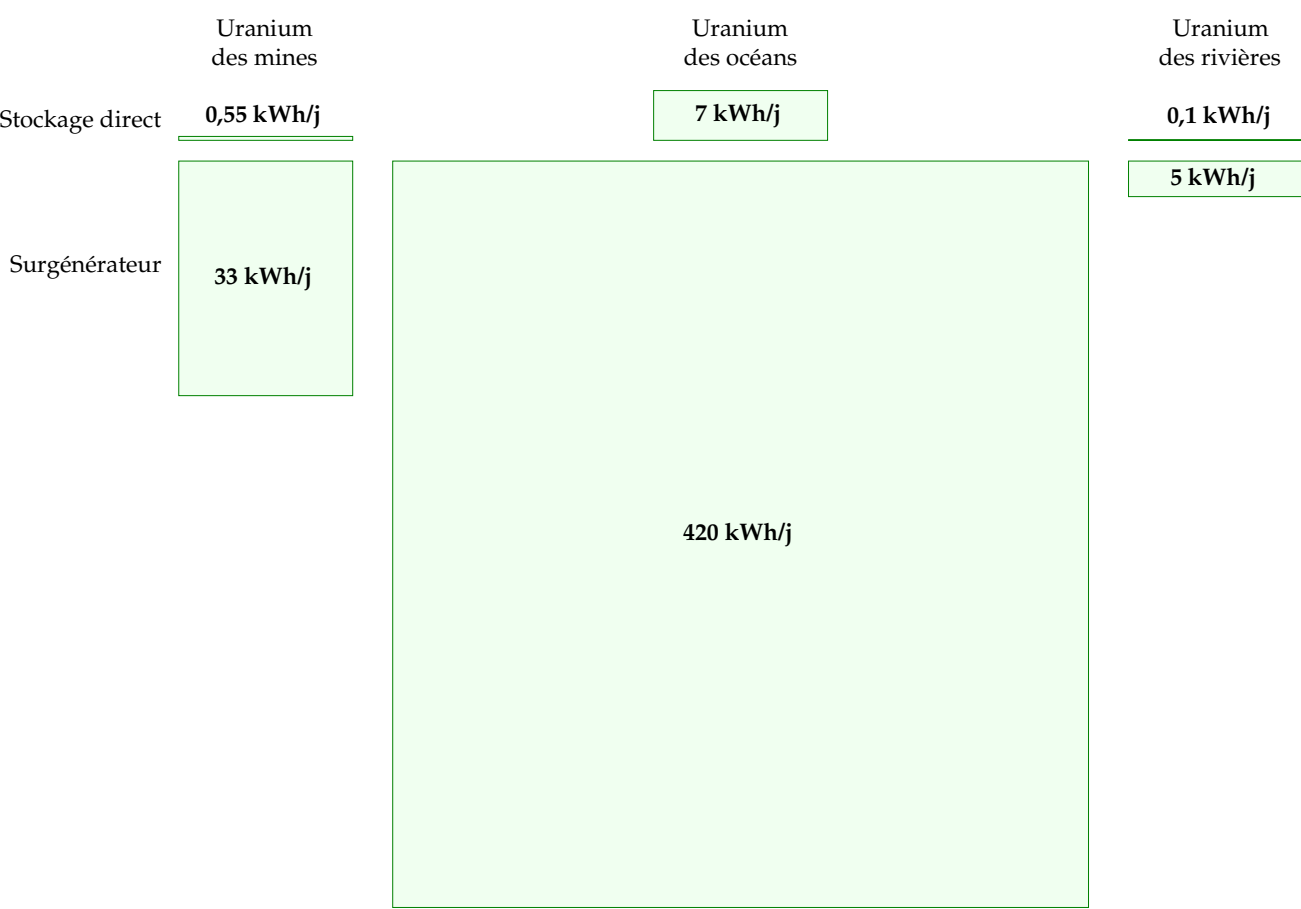
FIGURE 24.3. Des travailleurs poussant des lingots d'uranium dans un réacteur X-10 modéré au graphite.



FIGURE 24.4. La centrale nucléaire de Three Mile Island.



FIGURE 24.5. Le Dounreay Nuclear Power Development Establishment, dont l'objectif premier était le développement de la technologie des surgénérateurs. Photo par John Mullen.



fois le ^{238}U et le ^{235}U (contrairement aux réacteurs à stockage direct qui consomment essentiellement le ^{235}U). Tant que nous ne nous débarrassons pas du combustible usagé recraché par les réacteurs à stockage direct, nous pouvons également utiliser cette source d'uranium appauvri. L'uranium que l'on met dans les réacteurs à stockage direct n'est donc pas forcément gaspillé. Si on utilisait tout l'uranium extractible des mines (plus les stocks d'uranium appauvri) dans des réacteurs à neutrons rapides 60 fois plus efficaces, l'énergie produite pourrait être de **33 kWh par jour et par personne**.

La réaction des gens face aux réacteurs à neutrons rapides vont de « c'est une technologie expérimentale, dangereuse, qui a échoué, et dont personne ne devrait plus parler » à « nous avons les moyens de développer la surgénération, et nous devrions commencer immédiatement ». Je ne suis pas compétent pour évaluer les risques liés à la technologie surgénératrice, et je ne veux pas mélanger les affirmations d'ordre éthique et celles d'ordre factuel. Mon but est juste d'aider à comprendre les chiffres. La seule position éthique que je souhaite mettre en avant est : « *il nous faut un plan dont*

FIGURE 24.6. Puissance « durable » à partir de l'uranium. A titre de comparaison, la production de puissance actuelle avec le nucléaire dans le monde est de 1,2 kWh/j par personne. La production de puissance nucléaire en Grande-Bretagne a été de 4 kWh/j par personne et elle est en baisse.

le compte soit bon ».

Les réacteurs à stockage direct, utilisant l'uranium des océans

L'uranium des océans, s'il était totalement extrait et utilisé dans des réacteurs à stockage direct, correspondrait à une énergie totale de :

$$\frac{4,5 \text{ milliards de tonnes par planète}}{162 \text{ tonnes d'uranium par GW-an}} = 28 \text{ millions de GW-ans par planète.}$$

A quel rythme pourrait-on extraire l'uranium des océans ? Les océans circulent lentement autour de la Terre : la moitié de l'eau se trouve dans l'océan Pacifique, et les eaux du Pacifique en profondeur circulent jusqu'à la surface grâce à la circulation thermohaline, cet immense tapis roulant océanique, en environ 1 600 ans. Imaginons que 10 % de l'uranium soit extrait sur cette période de 1 600 ans. Cela représente un rythme d'extraction de 280 000 tonnes par an. Dans des réacteurs à stockage direct, cela permettrait de fournir de la puissance au rythme de :

$$2,8 \text{ millions de GW-ans} / 1\,600 \text{ ans} = 1\,750 \text{ GW,}$$

ce qui, partagés entre 6 milliards de personnes, fait **7 kWh par jour et par personne**. (Il y a actuellement 369 GW de réacteurs nucléaires, donc ce chiffre revient à multiplier par 4 la puissance nucléaire actuelle). J'en conclus que l'extraction de l'uranium des océans convertirait les réacteurs à stockage direct actuels en une voie possible « durable » — en supposant que les réacteurs à uranium puissent couvrir le coût énergétique du processus d'extraction de l'uranium des océans.

Les surgénérateurs, utilisant l'uranium des océans

Si les surgénérateurs sont 60 fois plus efficaces, la même quantité d'uranium extraite de l'océan pourrait fournir **420 kWh par jour et par personne**. Enfin un chiffre « durable » qui dépasse notre consommation actuelle ! — mais seulement grâce à l'aide conjointe de deux technologies, qui sont, pour l'une, à peine développée, et pour l'autre, impopulaire : l'extraction d'uranium océanique et la surgénération.

Exploiter l'uranium des rivières

Ce sont les rivières qui alimentent les océans en uranium, au rythme de 32 000 tonnes par an. Si 10 % de ce flux entrant étaient exploités, cela pourrait fournir assez de combustible pour 20 GW de réacteurs à stockage direct, ou pour 1 200 GW de surgénérateurs. Les surgénérateurs pourraient alors fournir **5 kWh par jour et par personne**.

Tous ces chiffres sont résumés dans la figure 24.6.

Et ça coûte combien ?

Comme toujours dans ce livre, mes principales estimations ne tiennent pas compte des paramètres économiques. Cependant, puisque la contribution potentielle de la puissance issue de l'uranium des océans est l'une des plus importantes dans notre liste de production « durable », il semble judicieux de discuter du caractère plausible de ce chiffre sur le plan économique.

Des chercheurs japonais ont trouvé une technique d'extraction de l'uranium de l'eau de mer, à un coût compris entre \$100 et \$300 par kg d'uranium extrait, à comparer au coût actuel de l'extraction d'uranium à partir de minerai, qui tourne autour de \$20 par kg. Mais l'énergie de l'uranium est tellement plus concentrée que celle des combustibles traditionnels que cette multiplication par 5 ou 15 du coût de l'uranium n'aurait que peu d'effet sur le coût de production de l'énergie nucléaire : c'est la construction et le démantèlement des centrales qui comptent pour l'essentiel du prix de l'énergie nucléaire, pas le coût du combustible. Même si le coût de l'uranium augmentait pour atteindre \$300 par kg, le coût de l'énergie nucléaire n'augmenterait, lui, que d'environ 0,3 centime d'euro par kWh. Ces frais d'extraction de l'uranium pourraient être réduits en les combinant à une autre utilisation de l'eau de mer — comme par exemple le refroidissement de la centrale.

Nous ne sommes pas encore au bout de nos peines : la technique japonaise est-elle utilisable à grande échelle ? Quel est le coût en énergie du traitement de toute l'eau des océans ? Dans les expériences des Japonais, trois cages remplies de 350 kg d'un matériau adsorbant qui attire l'uranium, ont collecté « plus de 1 kg de yellowcake en 240 jours ». Ce chiffre correspond à environ 1,6 kg par an. Ces cages ont une surface utile de filtration de 48 m². Pour alimenter une centrale nucléaire à stockage direct de 1 GW, nous allons avoir besoin de 160 000 kg par an, c'est-à-dire un rythme de production 100 000 fois plus important que celui de l'expérience japonaise. Si on essayait simplement de mettre à l'échelle la technique japonaise, qui a accumulé l'uranium marin de manière passive, la production d'une puissance de 1 GW aurait donc besoin de cages avec une surface collectrice de 4,8 km², et contenant 350 000 tonnes de matériau adsorbant — plus que le poids de l'acier dans le réacteur lui-même. Pour remettre ces chiffres énormes à l'échelle humaine, on peut dire que si l'uranium fournissait, disons, 22 kWh par jour et par personne, chaque réacteur de 1 GW serait partagé entre 1 million de personnes, et chacune de ces personnes aurait besoin de 0,16 kg d'uranium par an. Chaque personne aurait donc besoin d'un dixième de l'installation nécessaire à l'expérimentation japonaise : un poids de 35 kg par personne, et une surface collectrice de 5 m² par personne. Proposer la création de telles installations est donc équivalent, à la même échelle, à proposer des choses du genre « chaque personne devrait avoir 10 m² de panneaux solaires » ou « chaque personne

devrait disposer d'une voiture d'une tonne avec une place de parking pour la garer ». Un investissement, certes énorme, mais pas d'une taille totalement absurde non plus. Et ce calcul est valable pour les réacteurs à stockage direct. Pour les surgénérateurs, il faut 60 fois moins d'uranium, donc la quantité d'absorbant pour collecter l'uranium serait 60 fois moindre, soit 0,5 kg par personne.

La filière au thorium

Le thorium est un élément radioactif semblable à l'uranium. Autrefois utilisé pour fabriquer des manchons à incandescence, il est à peu près trois fois plus abondant dans la croûte terrestre que l'uranium. Les sols contiennent généralement 6 parties par million de thorium, et certains minéraux contiennent 12 % d'oxyde de thorium. L'eau de mer en contient très peu, car l'oxyde de thorium n'est pas soluble dans l'eau. Des réacteurs standard sont capables de brûler complètement le thorium (contrairement aux réacteurs classiques à uranium, qui ne consomment que moins de 1 % de l'uranium naturel). Du thorium est utilisé dans des réacteurs nucléaires en Inde. Si le minerai d'uranium venait à manquer, le thorium deviendrait probablement le principal combustible nucléaire.

Les réacteurs au thorium fournissent 3,6 milliards de kWh de chaleur par tonne de thorium, ce qui signifie qu'un réacteur de 1 GW consommerait environ 6 tonnes de thorium par an, en supposant que ses générateurs ont un rendement de 40 %. Les réserves mondiales de thorium sont estimées en tout à environ 6 millions de tonnes, soit 4 fois plus que les réserves connues montrées par le tableau 24.7. Comme pour l'uranium, il est probable que ces réserves soient sous-estimées, puisque la prospection du thorium n'est pas très valorisée aujourd'hui. Si on suppose, comme pour l'uranium, que ces ressources sont utilisées sur 1 000 ans, et partagées équitablement entre 6 milliards de personnes, on trouve que la puissance « durable » ainsi produite serait de 4 kWh/j par personne.

Un réacteur nucléaire alternatif qui peut utiliser le thorium, « l'amplificateur d'énergie », appelé aussi « réacteur à synchrotron » ou « Rubbia-tron », a été proposé par le prix Nobel de physique Carlo Rubbia et ses collègues. Ce réacteur, selon eux, pourrait convertir 6 millions de tonnes de thorium en 15 000 TW-an d'énergie, ou 60 kWh/j par personne pendant 1 000 ans. En supposant que la conversion en électricité se fasse avec un rendement de 40 %, il fournirait alors 24 kWh/j par personne pendant 1 000 ans. Et les déchets produits par le réacteur seraient également beaucoup moins radioactifs. Rubbia et ses collègues avancent qu'à terme, il serait possible d'extraire de nombreuses fois plus de thorium que les 6 millions de tonnes actuellement estimés de manière économiquement rentable. Si leur suggestion — 300 fois plus — est juste, alors le thorium et les réacteurs amplificateurs d'énergie pourraient offrir 120 kWh par jour et par personne pendant 60 000 ans.

Pays	Réserves (milliers de tonnes)
Turquie	380
Australie	300
Inde	290
Norvège	170
États-Unis	160
Canada	100
Afrique du sud	35
Brésil	16
Autres pays	95
Total mondial	1 580

TABLEAU 24.7. Ressources mondiales de thorium connues sous forme de monazite (économiquement extractibles).

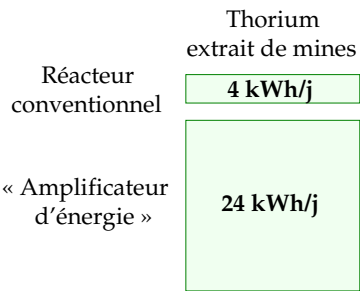


FIGURE 24.8. Différentes possibilités avec le thorium.

L'espace disponible

Imaginons que la Grande Bretagne décide sérieusement de se débarrasser des combustibles fossiles, et de créer un grand nombre de réacteurs nucléaires nouveaux, même si ce n'est pas « durable ». Si elle construisait assez de réacteurs pour rendre possible une décarbonisation significative des transports et du chauffage, serait-il possible de faire rentrer tous ces réacteurs nucléaires sur le territoire de la Grande-Bretagne ? Le chiffre qu'il nous faut connaître est la puissance par unité de surface de centrale nucléaire, qui est d'environ $1\,000\text{ W/m}^2$ (figure 24.10). Imaginons que l'on décide de produire 22 kWh par jour et par personne de puissance nucléaire — ce qui équivaut à 55 GW (à peu près ce que produit la France aujourd'hui avec ses centrales nucléaires) : il nous faudrait alors 55 centrales, chacune occupant environ un kilomètre carré, soit 0,02 % de la superficie totale du pays. Pour fournir en moyenne la même puissance, les fermes éoliennes ont besoin de 500 fois plus d'espace : 10 % de la surface totale du pays. Si les centrales nucléaires étaient placées par paires le long des côtes (longues de 3 000 km avec une résolution de 5 km) alors il y en aurait deux tous les 100 km. Donc même si la surface requise reste modeste, la fraction de littoral qu'engloutirait ces centrales serait de 2 % (2 km tous les 100 km).

Le coût du nettoyage

Quel est le coût de nettoyage de sites des centrales nucléaires ? L'autorité de démantèlement des centrales nucléaires a un budget annuel de 2,4 milliards d'euros pour les 25 prochaines années. L'industrie nucléaire a vendu à chaque Britannique 4 kWh/j pendant à peu près 25 ans. Le coût du démantèlement des centrales nucléaires est donc de l'ordre de 3 centimes d'euro par kWh. Ça fait une sacrément grosse subvention — bien que cela reste encore moins gros que la subvention actuellement payée à l'éolien offshore au Royaume-Uni (près de 9 centimes d'euro par kWh). De plus, l'essentiel du coût de ce nettoyage du nucléaire est associé à des installations de fabrication d'armes et pas à des centrales à usage civil.

La sûreté

La sûreté des centrales nucléaires en Grande-Bretagne reste un sujet de préoccupation majeure. L'usine de retraitement THORP (« *Thermal Oxide Reprocessing Plant* ») à Sellafield, construite en 1994 pour un coût de 1,8 milliards de livres sterling, a subi des fuites de plus en plus importantes à cause d'une conduite cassée entre août 2004 et avril 2005. Pendant huit mois, la fuite a laissé **85 000 litres** d'un fluide riche en uranium s'écouler dans un puisard qui était équipé de systèmes de sécurité conçus pour détecter immédiatement toute fuite d'au moins **15 litres**. Mais la fuite est

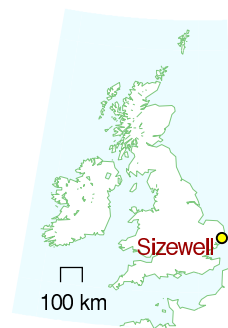


FIGURE 24.9. Centrales de Sizewell. Sizewell A, au premier plan, avait une capacité de 420 MW, et a été arrêtée fin 2006. Sizewell B, derrière, a une capacité de 1,2 GW. Photo de William Connolley.



FIGURE 24.10. Sizewell occupe moins de 1 km^2 . La distance entre deux lignes bleues représente une distance de 1 km. © Copyright de la couronne britannique, Ordnance Survey.

restée non détectée parce que les opérateurs n'avaient pas effectué l'ensemble des vérifications permettant de s'assurer que les systèmes de sécurité fonctionnaient correctement ; et de toute façon, les opérateurs avaient l'habitude d'ignorer les alarmes de sécurité.

Le système de sécurité possédait plusieurs niveaux de sécurité. Indépendamment des alarmes de sécurité, des mesures de surveillance de routine au niveau des fluides dans le puisard auraient dû détecter la présence anormale d'uranium dans le mois suivant le début de la fuite ; mais souvent, les opérateurs ne s'embêtaient pas à faire ces mesures de routine, parce qu'ils se sentaient déjà trop chargés. Et lorsqu'enfin, ils firent *vraiment* des mesures détectant la présence anormale d'uranium dans le puisard (le 28 août 2004, le 26 novembre 2004 et le 24 février 2005), aucune décision ne fut prise.

En avril 2005, 22 tonnes d'uranium avaient fui, mais aucun des systèmes de détection des fuites n'avait permis de relever la fuite. Celle-ci finit par être détectée par la *comptabilité*, lorsque les petits comptables remarquèrent qu'ils recevaient 10 % d'uranium en moins que ce que leurs clients prétendaient leur avoir livré ! Dieu merci, cette entreprise privée était motivée par le profit, n'est-ce pas ? La critique de l'inspecteur en chef des installations nucléaires fut cinglante : « La culture de fonctionnement de l'usine semblait être de laisser les instruments fonctionner en mode alarme plutôt que de vérifier l'alarme et de rectifier la faute correspondante. »

Si on laisse des sociétés privées construire de nouveaux réacteurs, comment s'assurer que des exigences de sûreté plus rigoureuses soient respectées ? Je ne sais pas.

Dans le même temps, nous ne devons pas nous laisser entraîner par un sentiment d'horreur devant les dangers de l'énergie nucléaire. L'énergie nucléaire n'est pas infiniment dangereuse. Elle est juste dangereuse, tout comme sont dangereux les mines de charbon, les entrepôts de pétrole, le fait de brûler des combustibles fossiles ou les turbines éoliennes. Même si nous n'avons aucune garantie que les accidents nucléaires pourront toujours être évités à l'avenir, je pense que la bonne manière d'évaluer le nucléaire est de le comparer de manière objective à d'autres sources d'énergie. Les centrales à charbon, par exemple, exposent la population à un certain niveau de radioactivité, parce que les cendres de charbon contiennent, typiquement, de l'uranium. Et en effet, selon un article publié dans la revue *Science*, les personnes en Amérique vivant à proximité d'une centrale au charbon sont exposées à des doses de radioactivité supérieures à celles qui vivent à proximité de centrales nucléaires.

Pour quantifier les risques auxquels le public est exposé face à différentes sources d'énergie, il nous faut une nouvelle unité. Je prendrai le « nombre de morts par GW-an (gigawatt-an) ». Permettez-moi de vous faire saisir ce que cela signifie si une source d'énergie a un taux de mortalité de 1 décès par GW-an. Un gigawatt-an est l'énergie produite par une centrale de 1 GW si elle fonctionne à fond pendant un an. La consommation

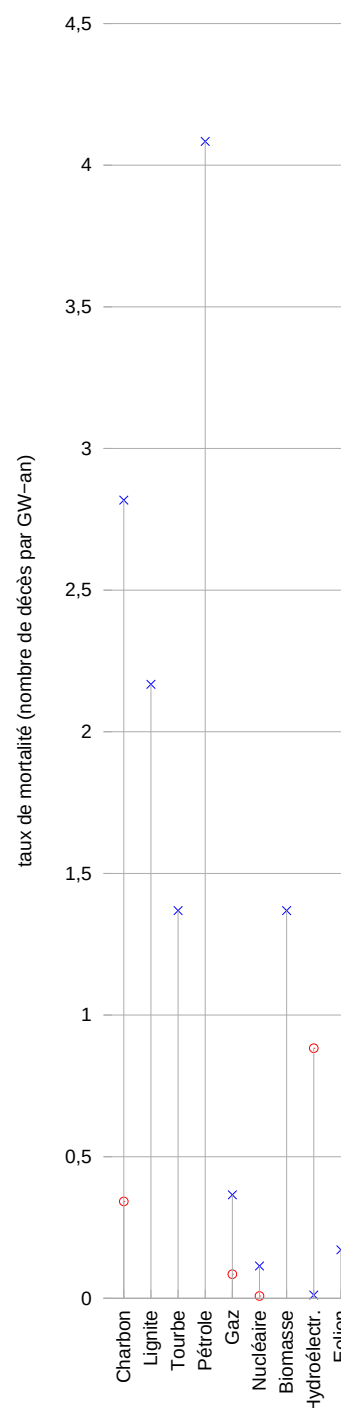


FIGURE 24.11. Taux de mortalité pour différentes technologies de production d'électricité. x : Estimations de l'Union européenne dans le cadre du projet ExternE. o : Institut Paul Scherrer.

d'électricité de Grande-Bretagne est en gros de 45 GW, ou, si vous préférez, de 45 gigawatts-ans par an. Donc si on obtient notre électricité de sources dont le taux de mortalité est de 1 décès par GW-an, cela voudrait dire que le système de production d'électricité britannique cause la mort de 45 personnes chaque année. A titre de comparaison, 3 000 personnes meurent chaque année sur les routes britanniques. Ainsi, si vous ne menez *pas* campagne contre l'abolition des routes, vous pouvez en déduire que « 1 décès par GW-an » est un taux de mortalité avec lequel, aussi désolant que cela puisse être, vous pourriez accepter de vivre. Évidemment, 10 fois moi, soit 0,1 décès par GW-an, ce serait préférable, mais il n'y a pas besoin de réfléchir longtemps pour comprendre que, malheureusement, la production d'énergie avec les combustibles fossiles doit avoir un coût en vies plus important que 0,1 décès par GW-an — pensez simplement aux désastres sur les plates-formes pétrolières, les hélicoptères perdus en mer, les pipelines qui prennent feu, les explosions de raffinerie et les accidents dans les mines de charbon : tous les ans, en Grande-Bretagne, il y a des dizaines de victimes d'accidents mortels dans la chaîne de traitement des combustibles fossiles.

Discutons donc des taux de mortalité réels pour un ensemble de sources d'électricité. Les taux de mortalité varient énormément d'un pays à l'autre. En Chine, par exemple, le taux de mortalité dans les mines de charbon, par tonne de charbon fournie, est 50 fois plus grand que celui de la plupart des autres pays. La figure 24.11 montre des chiffres provenant d'études faites par l'Institut Paul Scherrer et par un projet de l'Union européenne nommé ExternE, qui ont fait des estimations globales de toutes les conséquences de la production d'énergie. Selon les chiffres de l'Union européenne, le charbon ; la lignite et le pétrole ont les taux de mortalité les plus élevés, suivis par la tourbe et la biomasse, dont les taux de mortalité dépassent 1 décès par GW-an. Le nucléaire et l'éolien sont les meilleurs, avec des taux de mortalité inférieurs à 0,2 décès par GW-an. L'hydroélectricité est la meilleure de toutes selon l'étude européenne, mais se retrouve être la pire dans l'étude de l'Institut Paul Scherrer, qui a regardé des pays différents.

Énergie nucléaire intrinsèquement sûre

Piqués par les inquiétudes au sujet des accidents nucléaires, les ingénieurs ont imaginé nombre de nouveaux réacteurs avec des propriétés de sûreté améliorées. Le modèle de réacteur à très haute température GT-MHR, par exemple, est annoncé comme intrinsèquement sûr ; et de plus, son rendement de conversion de la chaleur en électricité est meilleur que les centrales nucléaires conventionnelles [gt-mhr.ga.com].



FIGURE 24.12. La centrale nucléaire de Tchernobyl (en haut), et la ville abandonnée de Prypiat, qui la servait (en bas). Photos par Nik Stanbridge.

Légendes urbaines

Deux défauts de l'énergie nucléaire largement cités sont les coûts de construction des centrales et les déchets. Voyons à présent certains aspects de ces questions.

Construire une centrale nucléaire requiert des quantités énormes de béton et d'acier, des matériaux dont la fabrication implique une pollution énorme de CO₂.

L'acier et le béton dans une centrale nucléaire de 1 GW ont une empreinte carbone d'environ 300 000 tonnes de CO₂.

Si on étale ce nombre « énorme » sur les 25 ans de la vie d'un réacteur, on peut exprimer cette contribution à l'intensité carbone totale d'une centrale nucléaire dans des unités standard (grammes de CO₂ par kWh(e)) :

$$\begin{aligned} \text{intensité en carbone} &= \frac{300 \times 10^9 \text{ g}}{10^6 \text{ kW(e)} \times 220\,000 \text{ h}} \\ \text{de la construction} &= 1,4 \text{ g/kWh(e)}. \end{aligned}$$

C'est beaucoup plus petit que le point de référence que constituent les combustibles fossiles, qui est de 400 g de CO₂/kWh(e). Pour sa part, le GIEC estime que le coût carbone *total* de l'énergie nucléaire (y compris la construction des centrales, le traitement complet du combustible nucléaire et le démantèlement des centrales) est inférieur à 40 g de CO₂/kWh(e) (Sims et al., 2007).

Surtout, ne vous méprenez pas sur mes intentions : je ne cherche pas à être pro-nucléaire. Je suis juste pro-arithmétique.

Les déchets provenant des réacteurs nucléaires ne sont-ils pas un énorme problème ?

Comme nous l'avons noté en début de ce chapitre, le volume de déchets provenant des réacteurs nucléaires est relativement petit. Alors que les cendres provenant de dix centrales à charbon auraient une masse de quatre millions de tonnes par an (soit 40 litres par personne et par an), les déchets nucléaires provenant des dix centrales nucléaires britanniques n'occupent qu'un volume de 0,84 litre par personne et par an — le volume d'une bouteille de vin par personne et par an (figure 24.13).

L'essentiel de ces déchets sont de faible activité ; 7 % sont des déchets de moyenne activité, et seulement 3 % des déchets — 25 millilitres par an — sont de haute activité.

Les déchets de haute activité constituent le vrai problème. Il est classique de conserver ces déchets-là au niveau du réacteur durant les 40 premières années. Ils sont stockés dans des piscines remplies d'eau pour les refroidir. Après 40 ans, leur niveau de radioactivité est 1 000 fois plus faible, et il continue de baisser. Si on *retraite* les déchets, en séparant l'uranium du plutonium pour pouvoir en réutiliser une partie comme nouveau

combustible nucléaire, alors après 1 000 ans, le niveau de radioactivité des déchets de haute activité est à peu près le même que celui du minerai d'uranium. Par conséquent, les ingénieurs chargés du stockage des déchets doivent concevoir un plan pour sécuriser les déchets de haute activité pendant à peu près 1 000 ans.

Est-ce si difficile ? 1 000 ans, c'est certainement une longue durée comparée aux durées de vie des gouvernements et des pays ! Mais les volumes en jeu sont si petits, que les déchets nucléaires ne sont, me semble-t-il, qu'un petit souci, comparé à toutes les autres formes de déchets que nous imposons aux générations futures. Avec 25 millilitres par an, les déchets nucléaires d'une vie entière n'atteignent même pas deux litres, un volume à peine plus grand que celui d'une grande bouteille d'eau. Même en le multipliant par 60 millions de personnes, le volume de déchets nucléaires d'une vie entière ne paraissent pas ingérables : 105 000 mètres cubes. C'est le volume de 35 bassins de piscines olympiques. Si on mettait ces déchets dans une couche d'un mètre d'épaisseur, ils occuperaient à peine le dixième d'un kilomètre carré.

Il y a déjà de très nombreux endroits interdits d'accès aux humains. Je n'ai pas le droit d'entrer dans votre jardin. Ni vous dans le mien. Ni vous ni moi ne sommes les bienvenus à la résidence royale de Balmoral. Des panneaux « Défense d'entrer » fleurissent partout. Downing Street, l'aéroport d'Heathrow, les installations militaires, les mines désaffectées — tous sont interdits d'accès. Est-il impossible d'imaginer qu'on puisse définir une autre zone d'un kilomètre carré — peut-être même profondément sous terre — qui soit interdite d'accès pendant 1 000 ans ?

Comparez ces 25 millilitres par personne et par an de déchets nucléaires de haute activité aux autres formes traditionnelles de déchets que nous jetons aujourd'hui : déchets municipaux — 517 kg par personne et par an ; déchets dangereux — 83 kg par personne et par an.

Parfois, les gens comparent les futurs déchets potentiels aux déchets nucléaires auxquels nous devons déjà faire face, à cause de bons vieux réacteurs actuels. Voici les chiffres pour le Royaume-Uni. Le volume de « déchets d'activité significative » projeté jusqu'en 2120, suite au démantèlement des installations nucléaires actuelles, est de 478 000 m³. De ce volume, 2 % (environ 10 000 m³) formeront, d'une part, les déchets de haute activité (1 290 m³) et, d'autre part, le combustible restant (8 150 m³) ; ces 2 % concentrent à eux seuls 92 % de la radioactivité totale. Construire 10 nouveaux réacteurs nucléaires (10 GW) ajouterait à ce total 31 900 m³ de combustible consommé supplémentaire. C'est le même volume que celui de dix bassins de piscines.

Si la fission ou la fusion nucléaire nous fournissent une quantité d'énergie à ce point énorme, est-ce que toute cette énergie que nous allons relâcher dans l'environnement ne va pas aggraver le réchauffement climatique ?

Voilà une question rigolote. Et puisque nous avons bien fait attention

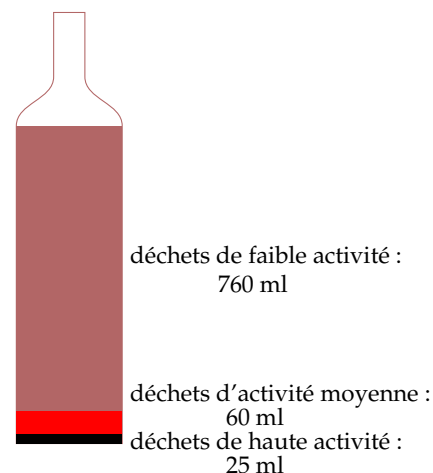


FIGURE 24.13. Les déchets nucléaires britanniques, par personne et par an, ont un volume à peine plus gros qu'une bouteille de vin.

à tout exprimer dans ce livre dans un seul ensemble d'unités, y répondre sera très facile. Tout d'abord, reprenons les chiffres-clés au sujet de l'équilibre énergétique mondial de la page 1 : la puissance solaire moyenne absorbée par l'atmosphère, les continents et les océans est de 238 W/m^2 ; multiplier par deux la concentration atmosphérique de CO_2 augmenterait effectivement le réchauffement net de 4 W/m^2 . Les spécialistes considèrent que cette augmentation de 1,7 % du réchauffement est une mauvaise nouvelle pour le climat. Les variations de la puissance solaire durant le cycle du Soleil de 11 ans sont de l'ordre de $0,25 \text{ W/m}^2$. Faisons maintenant l'hypothèse que dans environ 100 ans, la population mondiale soit de 10 milliards de personnes, et que tout le monde ait le niveau de vie européen, consommant 125 kWh par jour à partir de sources fossiles, du nucléaire ou de l'exploitation minière de la géothermie. La surface de territoire par personne serait de $51\,000 \text{ m}^2$. En divisant la puissance par personne par la surface par personne, on trouve que la puissance supplémentaire apportée par la consommation d'énergie par les hommes serait de $0,1 \text{ W/m}^2$. C'est un quarantième des 4 W/m^2 qui nous tracassent actuellement, et un peu moins que les $0,25 \text{ W/m}^2$ dus aux variations solaires. Donc oui, avec ces hypothèses, la production de puissance par les hommes serait un contributeur au changement climatique planétaire, mais qui serait à peine visible.

J'ai entendu dire qu'on ne pouvait pas construire les réacteurs nucléaires assez vite pour qu'ils puissent apporter une contribution vraiment utile.

Le problème au sujet de la rapidité de construction des réacteurs nucléaires a été largement exagéré, grâce à une technique de présentation trompeuse des choses, que j'appelle le « terrain de jeu magique ». Avec cette technique, on semble comparer deux choses, mais les termes de la comparaison sont modifiés en cours de route. L'éditeur de la rubrique Environnement du quotidien *The Guardian*, résumant un rapport de l'*Oxford Research Group*, écrit : « Pour que l'énergie nucléaire puisse apporter une contribution significative à une réduction des émissions de carbone planétaires sur les deux prochaines générations, il faudrait que l'industrie construise près de 3 000 nouveaux réacteurs — ou à peu près une par semaine pendant 60 ans. Un programme de construction et d'alimentation nucléaire civil d'une telle ampleur est un projet chimérique, qui est complètement infaisable. Historiquement, le rythme de construction le plus rapide a été de 3,4 réacteurs par an. » 3 000, ça paraît beaucoup plus grand que 3,4, n'est-ce pas ! Dans cette application du « terrain de jeu magique », il y a un changement d'échelle non seulement dans le temps, mais aussi dans l'espace. Alors que le premier chiffre (3 000 nouveaux réacteurs sur 60 ans) s'applique à la Terre entière, le second (3,4 nouveaux réacteurs par an) est le rythme maximum de construction pour un seul pays (la France) !



Une présentation plus honnête aurait été de conserver la comparaison sur l'échelle de la planète. La France possède 59 des 429 réacteurs nu-

cléaires en activité dans le monde. Donc il est plausible que le rythme le plus rapide de construction de réacteurs pour la planète entière soit quelque chose du genre 10 fois celui de la France, c'est-à-dire 34 nouveaux réacteurs par an. Et le rythme requis (3 000 nouveaux réacteurs sur 60 ans), c'est 50 nouveaux réacteurs par an. Donc l'affirmation que « la construction nucléaire civile à cette échelle est un projet chimérique, qui est complètement infaisable », ce ne sont que des foutaises. Oui, c'est vrai, c'est un rythme de construction énorme. Mais il est tout à fait comparable aux rythmes historiques de construction.

Est-ce que mon affirmation selon laquelle, historiquement, le rythme maximum de construction à l'échelle mondiale a dû tourner autour de 34 nouveaux réacteurs nucléaires par an, est vraiment raisonnable ? Regardons les données. La figure 24.14 montre la puissance du parc nucléaire mondial en fonction du temps, en ne prenant en compte que les centrales encore en activité en 2007. Le rythme de nouvelles constructions était le plus élevé en 1984, et il était alors de (roulements de tambour, s'il vous plaît...) d'environ 30 GW par an — c'est-à-dire environ 30 réacteurs de 1 GW. Et voilà !

Et la fusion nucléaire ?

On nous annonce que l'on va mettre le Soleil en boîte. La formule est jolie. Le problème, c'est que l'on ne sait pas fabriquer la boîte.

Sébastien Balibar, Directeur de recherche, CNRS

L'énergie de la fusion est expérimentale et ne repose que sur des suppositions. A mon avis, il serait imprudent de supposer qu'un jour, le problème de la fusion *sera* résolu. Mais j'ai l'honneur de vous annoncer que je suis en mesure d'estimer la quantité de puissance que la fusion pourrait délivrer, si ce problème était résolu.

Les deux réactions de fusion qu'on considère comme les plus prometteuses sont les suivantes :

la réaction DT, qui fait fusionner du deutérium avec du tritium, et produit de l'hélium ; et

la réaction DD, qui fait fusionner du deutérium avec du deutérium.

Le deutérium, un isotope lourd de l'hydrogène que l'on trouve dans la nature, peut être obtenu à partir d'eau de mer. Le tritium, un isotope plus lourd de l'hydrogène, ne se trouve pas naturellement dans de grandes quantités (parce qu'il a une demi-vie de seulement 12 ans), mais on peut le fabriquer à partir du lithium.

ITER est un projet international destiné à déterminer comment construire un réacteur de fusion qui fonctionnerait sans interruption. Ce prototype utilisera la réaction DT, que l'on préfère à la réaction DD parce qu'elle libère plus d'énergie et qu'elle requiert une température de « seulement »

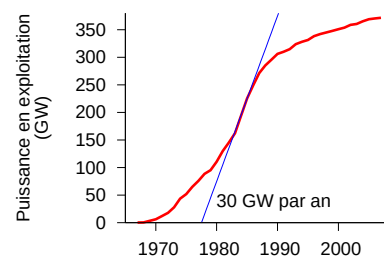


FIGURE 24.14. Graphique montrant la puissance nucléaire totale qui a été construite depuis 1967 dans le monde, et qui est toujours en activité. Le rythme de construction mondial a culminé en 1984, avec 30 GW de puissance nucléaire construite par an.



FIGURE 24.15. L'intérieur d'un réacteur à fusion expérimental. L'image partagée montre le réservoir de vide du JET (Joint European Torus) avec, en surimpression, une image d'un plasma dans le JET, prise avec une caméra de télévision classique. Photo : EFDA-JET.

100 millions de degrés Celsius, alors que la réaction DD requiert une température de 300 millions de degrés Celsius (la température maximum dans le Soleil est de 15 millions de degrés Celsius).

Fantasmons un peu en supposant que le projet ITER soit couronné de succès. Quelle puissance durable la fusion pourrait-elle alors fournir ? Les centrales utilisant la réaction DT, alimentée par du lithium, verront leur jus s'épuiser quand le lithium lui-même s'épuisera. Entre temps, on peut espérer que le « fantasme : épisode 2 » sera arrivé : des réacteurs de fusion utilisant seulement du deutérium.

Je vais appeler ces deux sources d'énergie fantasmées la « fusion au lithium » et la « fusion au deutérium », du nom du principal combustible dont nous pourrions nous inquiéter dans l'un et l'autre des cas. Estimons maintenant combien d'énergie chacune de ces sources pourrait fournir.

La fusion au lithium

Les réserves mondiales de lithium sont estimées à 9,5 millions de tonnes sous forme de minerai. Si toutes ces réserves étaient dédiées à la fusion sur 1 000 ans, la puissance fournie serait de **10 kWh/j par personne**.

Il existe une autre source de lithium : l'eau de mer, dans laquelle le lithium se trouve avec une concentration de 0,17 parties par million. Les besoins en énergie de la production de lithium à partir d'eau de mer à un rythme de 10 millions de kilogrammes par an sont estimés à 2,5 kWh(e) par gramme de lithium. Si les réacteurs de fusion fournissaient 2 300 kWh(e) par gramme de lithium, la puissance délivrée serait alors de **105 kWh/j par personne** (en supposant une population de 6 milliards de personnes). A ce rythme, le lithium dans les océans pourrait durer plus d'un million d'années.

La fusion au deutérium

Si on imagine que les scientifiques et les ingénieurs arrivent à résoudre le problème du contrôle de la réaction DD, alors nous avons quelques très bonnes nouvelles. Il y a 33 g de deutérium dans chaque tonne d'eau, et en faisant fusionner seulement un gramme de deutérium, cela libérerait la quantité d'énergie ahurissante de 100 000 kWh. En gardant à l'esprit que la masse des océans est de 230 millions de tonnes par personne, on peut en déduire qu'il y aurait encore assez de deutérium pour fournir à chaque personne d'une population mondiale dix fois plus nombreuse qu'aujourd'hui une puissance de 30 000 kWh par jour (cela fait plus de 100 fois la consommation américaine moyenne actuelle) pendant un million d'années (figure 24.17).

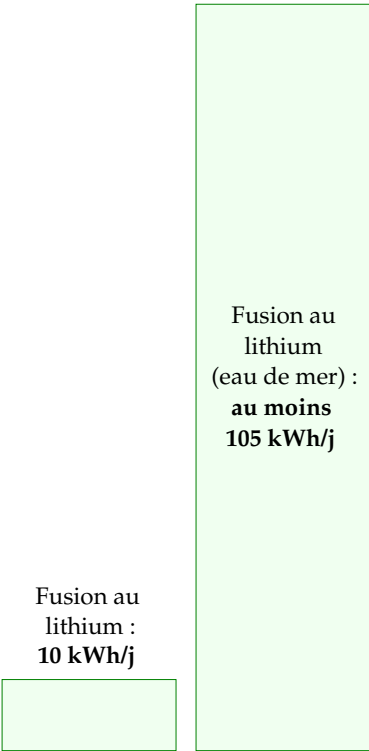


FIGURE 24.16. La fusion reposant sur le lithium, à supposer qu'elle soit utilisée de manière « durable » et équitable, pourrait répondre à notre consommation à hauteur de notre demande actuelle. Le lithium extrait de mines pourrait fournir 10 kWh/j par personne pendant 1 000 ans ; le lithium extrait de l'eau de mer pourrait fournir 105 kWh/j par personne pendant plus d'un million d'années.

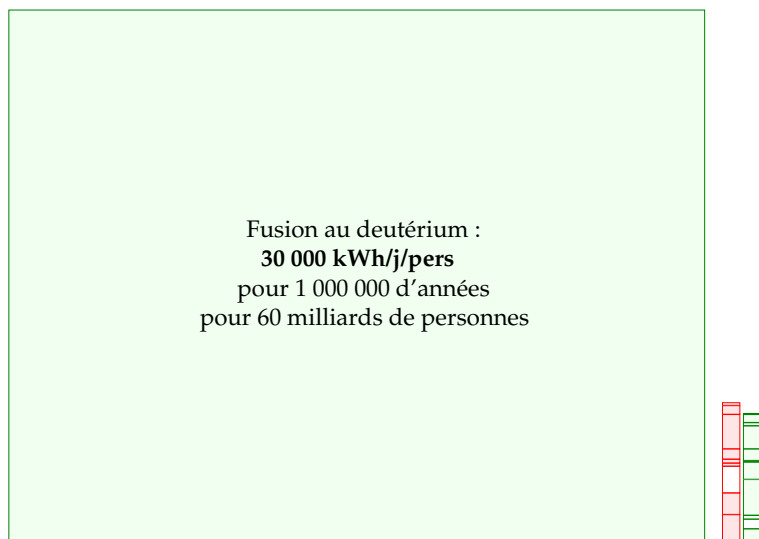


FIGURE 24.17. La fusion reposant sur le deutérium, si elle est réalisable, offre de l'énergie durable à profusion pour des millions d'années. L'échelle de ce diagramme est réduite 10 fois dans chacune de ses dimensions pour que la contribution potentielle de la fusion puisse tenir dans la page. Les piles rouges et vertes de la figure 18.1 sont ajoutées à la même échelle à titre de comparaison.

Notes et bibliographie

Page n°

- 190 *Figure 24.1.* Source : World Nuclear Association [5qntkb]. La capacité totale des réacteurs nucléaires opérationnels est de 372 GW(e), qui consomment 65 000 tonnes d'uranium par an. Les États-Unis ont un parc de 99 GW, la France de 63,5 GW, le Japon de 47,6 GW, la Russie de 22 GW, l'Allemagne de 20 GW, la Corée du sud de 17,5 GW, l'Ukraine de 13 GW, le Canada de 12,6 GW, et le Royaume-Uni de 11 GW. En 2007, l'ensemble des réacteurs à travers le monde a généré 2 608 TWh d'électricité, ce qui fait une moyenne de 300 GW, ou **1,2 kWh par jour et par personne**.
- 192 *Les surgénérateurs obtiennent 60 fois plus d'énergie à partir de l'uranium.* Source : www.world-nuclear.org/info/inf98.html. Le Japon est actuellement le leader en matière de développement de surgénérateurs.
- *Un réacteur nucléaire à stockage direct d'une puissance d'un gigawatt consomme 162 tonnes d'uranium par an.*
 Source : www.world-nuclear.org/info/inf03.html. Une centrale de 1 GW(e) avec un rendement de conversion thermique de 33 %, qui fonctionne avec un facteur de charge de 83 % a l'empreinte amont suivante : l'extraction minière — 16 600 tonnes de minerai contenant 1 % d'uranium ; la concentration du minerai — 191 tonnes d'oxyde d'uranium (contenant 162 tonnes d'uranium naturel) ; l'enrichissement et la fabrication du combustible — 22,4 tonnes d'oxyde d'uranium (contenant 20 tonnes d'uranium enrichi). L'enrichissement requiert 115 000 UTS ; se référer à la page 12 pour le coût énergétique des UTS (unités de travail de séparation).
 - *Il a été estimé que la ressource à faible concentration en uranium était plus de 1 000 fois plus importante que les 27 millions de tonnes dont nous venons de faire l'hypothèse.* Deffeyes et MacGregor (1980) estiment que la ressource d'uranium à des concentrations de 30 ppm ou plus est de 3×10^{10} tonnes. (La concentration moyenne d'uranium dans le minerai exploité en Afrique du sud en 1985 et en 1990 était de 150 ppm. Dans les phosphates, la concentration moyenne tourne typiquement autour de 100 ppm.)
 Voici ce que la World Nuclear Association disait en juin 2008 au sujet des réserves d'uranium :
 « De temps en temps, des inquiétudes sont soulevées au sujet des ressources connues, qui pourraient être insuffisantes lorsqu'on les apprécie en termes d'un multiple du rythme de consommation actuel. Mais c'est la même illusion que celle attribuée aux *Limites à la croissance*, [...] qui ne prend pas en compte la nature très limitée de la connaissance que l'on a à tout instant de ce qui se trouve vraiment dans la croûte terrestre. Notre connaissance de la géologie est telle

que nous pouvons rester confiants du fait que les ressources identifiées de minerais métalliques ne constituent qu'une petite fraction de ce qui est réellement présent dans la croûte terrestre.

« Les ressources mesurées d'uranium, la quantité connue pour être économiquement récupérable de mines, [...] dépendent de l'intensité de l'effort d'exploration passé, et sont simplement une déclaration de ce qui est connu plutôt que de ce qui se trouve dans la croûte terrestre.

« Les ressources mondiales actuellement mesurées (5,5 millions de tonnes) [...] sont suffisantes pour durer plus de 80 ans. Cela représente un niveau de ressources assurées plus élevé que ce qui est habituel pour la plupart des minerais. De futures explorations et des prix plus élevés vont certainement, sur la base des connaissances géologiques actuelles, apporter des ressources supplémentaires lorsque les ressources actuelles seront entièrement consommées. »

« Des acteurs économiquement rationnels n'investiront dans la prospection de ces nouvelles réserves que lorsqu'ils penseront avec un haut niveau de confiance pouvoir en obtenir un retour, ce qui généralement requiert des signaux de prix positifs du fait d'une tendance de l'offre à être insuffisante. Si le système économique fonctionne correctement et maximise le rendement du capital, il ne devrait jamais y avoir, à tout moment, plus que quelques décennies de réserves pour n'importe quelle ressource de matières premières. »

[L'exploration a un coût; prospecter pour trouver de l'uranium, par exemple, a eu un coût de 1 à 1,50 dollar US par kg d'uranium (3,4 dollars par mégajoule), ce qui correspond à 2 % du prix spot de 78 dollars par kilogramme d'uranium; en revanche, la moyenne des coûts de prospection pour le pétrole brut a été de l'ordre de 6 dollars par baril (1 050 dollars par mégajoule) (12 % du prix spot) sur au moins les trois dernières décennies.]

« Contrairement aux métaux, qui sont demandés depuis des siècles, la société a à peine commencé à utiliser l'uranium. Il n'y a eu qu'un seul cycle d'exploration-découverte-production, conduit pour une large part par les pics de prix de la fin des années 1970.

« Il est prématuré de parler d'une rareté à long terme de l'uranium alors que l'intégralité de l'industrie nucléaire est si jeune qu'un seul cycle de réapprovisionnement de la ressource a été nécessaire. » www.world-nuclear.org/info/inf75.html

Pour en savoir plus : Herring (2004); Price et Blaise (2002); Cohen (1983).

Le GIEC, citant l'OCDE, projette qu'aux niveaux de consommation de 2004, l'uranium des ressources conventionnelles et des phosphates durerait 670 ans dans des réacteurs à stockage direct, 20 000 ans dans des surgénérateurs avec recyclage du plutonium, et 160 000 ans dans des surgénérateurs recyclant l'uranium et tous les actinides (Sims et al., 2007).

- 195 *Des chercheurs japonais ont trouvé une technique pour extraire l'uranium de l'eau de mer.* L'estimation du prix de \$100 par kg provient de Seko et al. (2003) et [y3wnzr]; l'estimation de \$300 par kg provient de OECD Nuclear Energy Agency (2006, p130).

La technique d'extraction de l'uranium utilise du tissu imbibé plongé dans l'océan durant quelques mois; le tissu est fait de fibres polymères qui sont rendues collantes en les irradiant avant d'être imbibées; les fibres collantes arrivent à collecter 2 grammes d'uranium par kilogramme de fibre.

- *La dépense pour extraire l'uranium pourrait être réduite en la combinant avec un autre usage de l'eau de mer — par exemple le refroidissement de la centrale.* L'idée d'une île alimentée en puissance par du nucléaire et produisant de l'hydrogène a été émise par C. Marchetti. Des surgénérateurs seraient refroidis par l'eau de mer et extrairaient l'uranium de l'eau de refroidissement à un rythme de 600 tonnes d'uranium pour 500 000 millions de tonnes d'eau de mer.
- 196 *Les réacteurs au thorium fournissent $3,6 \times 10^9$ kWh de chaleur par tonne de thorium.* Source : www.world-nuclear.org/info/inf62.html. Il reste des possibilités de progrès dans la conception des réacteurs, donc il est possible que ce chiffre puisse grimper à l'avenir.
- *Un réacteur nucléaire alternatif qui peut utiliser le thorium, « l'amplificateur d'énergie » ...* Voir Rubbia et al. (1995), web.ift.uib.no/~lillestol/Energy_Web/EA.html, [32t5zt], [2qr3yr], [ynk54y].
- *Ressources mondiales de thorium connues sous forme de monazite.* Source : US Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 1999. [y17tkm] Cité dans UIC Nuclear Issues Briefing Paper #67, novembre 2004.

« D'autres minerais contenant du thorium à plus forte concentration, comme les thorites, deviendraient plus probablement des sources possibles si la demande augmentait de manière significative. »

[yju4a4] omet le chiffre pour la Turquie, que l'on peut trouver ici : [yeyr7z].

197 *L'autorité de démantèlement des centrales nucléaires a un budget annuel de 2 millions de livres (2,4 millions d'euros) pour les 25 prochaines années.* Ce budget de nettoyage semble en augmentation permanente. Le dernier chiffre pour le coût total de démantèlement est de 73 milliards de livres sterling (88 milliards d'euros). news.bbc.co.uk/1/hi/uk/7215688.stm Néanmoins, il faut préciser que ce budget est dédié au nettoyage, non seulement des centrales nucléaires civiles, mais aussi des installations militaires de fabrication de la bombe nucléaire, à Sellafield. La part du lion reviendra donc au nettoyage de la pagaille militaire plutôt qu'à celui de la production de puissance dans le civil. Ce qui veut dire qu'ici, le coût par kWh du nettoyage du vieux nucléaire civil est nettement surestimé.

– *L'industrie du nucléaire a vendu 4 kWh/j à chaque Britannique pendant à peu près 25 ans.* La quantité totale d'électricité produite jusqu'en 2006 était d'environ 2 200 TWh. Source : Bilan énergétique de Stephen Salter pour le Scottish National Party.

198 *La critique de l'inspecteur en chef des installations nucléaires fut cinglante : ...* (Weightman, 2007).

– *L'énergie nucléaire n'est pas infiniment dangereuse. Elle est juste dangereuse.* Pour en savoir plus sur les risques : Kammen et Hassenzahl (1999).

– *Les personnes en Amérique vivant à proximité d'une centrale au charbon sont exposées à des doses de radioactivité supérieures à celles qui vivent à proximité de centrales nucléaires.* Source : McBride et al. (1978). L'uranium et le thorium sont présents dans le charbon à des concentrations d'environ 1 ppm et 2 ppm, respectivement.

Pour en savoir plus : gabe.web.psi.ch/research/ra/ra_res.html,
www.physics.ohio-state.edu/~wilkins/energy/Companion/E20.12.pdf.xpdf.

199 *Le nucléaire et l'éolien ont les taux de mortalité les plus faibles.* Voir aussi Jones (1984). Ces taux de mortalité proviennent d'études qui font des prévisions sur l'avenir. On peut aussi regarder le passé.

En Grande-Bretagne, l'énergie nucléaire a généré 20 GW-an d'électricité, et l'industrie du nucléaire a eu un mort, un travailleur qui est décédé à Chapelcross en 1978 [4f2ekz]. Un décès pour 200 GW-an est un taux de mortalité remarquablement faible comparée à l'industrie des combustibles fossiles.

A l'échelle mondiale, le taux de mortalité historique dû à l'énergie nucléaire civile est difficile à estimer. La fusion du cœur de réacteur à Three Mile Island n'a tué personne, et les fuites associées sont estimées avoir provoqué peut-être la mort d'une personne depuis l'accident. L'accident à Tchernobyl a d'abord tué 62 personnes qui sont mortes d'une exposition directe, et 15 personnes qui vivaient autour du site et qui sont morts plus tard d'un cancer de la thyroïde ; on estime que, dans la région, 4 000 autres personnes sont mortes de cancer, et qu'à l'échelle mondiale, environ 5 000 personnes (parmi les 7 millions qui ont été exposées aux retombées radioactives) sont mortes de cancer du fait de Tchernobyl (Williams et Baverstock, 2006) ; mais détecter ces décès est impossible parce que les cancers, dont la plupart sont causés par les radiations nucléaires naturelles, provoquent déjà 25 % des décès en Europe.

Une manière possible d'estimer le taux de mortalité mondial dû à l'énergie nucléaire civile est de diviser cette estimation du bilan des victimes de Tchernobyl (9 000 morts) par la production cumulée de l'énergie nucléaire entre 1969 et 1996, qui était de 3 685 GW-an. Cela donne un taux de mortalité de 2,4 décès par GW-an.

Quant aux décès attribués à l'éolien, le Caithness Windfarm Information Forum www.caithnesswindfarms.co.uk liste 49 victimes à l'échelle mondiale entre 1970 et 2007 (35 travailleurs de l'industrie éolienne et 14 personnes du public). En 2007, Paul Gipe a listé 34 décès au total dans le monde [www.wind-works.org/articles/BreathLife.html]. Au milieu des années 1990, le taux de mortalité associé à l'énergie éolienne était de 3,5 décès par GW-an. D'après Paul Gipe, le taux de mortalité mondiale de l'énergie éolienne est tombé à 1,3 décès par GW-an à la fin de l'an 2000.

Les taux de mortalités historiques sont donc plus élevés que les taux prédits, aussi bien pour l'énergie nucléaire que l'énergie éolienne.

- 200 *L'acier et le béton dans une centrale nucléaire de 1 GW ont une empreinte carbone d'environ 300 000 tonnes de CO₂.* Une centrale nucléaire de 1 GW contient 520 000 m³ de béton (1,2 million de tonnes) et 67 000 tonnes d'acier [2k8y7o]. En prenant pour hypothèse 240 kg de CO₂ par m³ de béton [3pvf4j], l'empreinte du béton de la centrale est d'environ 100 000 tonnes de CO₂. Selon Blue Scope Steel [4r7zpg], l'empreinte de l'acier est d'environ 2,5 tonnes de CO₂ par tonne d'acier. Donc les 67 000 tonnes d'acier de la centrales ont une empreinte d'environ 170 000 tonnes de CO₂.
- 201 *Discussion sur les déchets nucléaires.* Sources : www.world-nuclear.org/info/inf04.html, [49hcnw], [3kduo7].
Futurs déchets nucléaires potentiels comparés aux déchets nucléaires actuels. Committee on Radioactive Waste Management (2006).
- 204 *Les réserves mondiales de lithium sont estimées à 9,5 millions de tonnes.* Les principales sources de lithium se trouvent en Bolivie (56,6 %), au Chili (31,4 %) et aux États-Unis (4,3 %). www.dnpm.gov.br
- *Il existe une autre source de lithium : l'eau de mer...* Plusieurs techniques d'extraction ont été étudiées (Steinberg et Dang (1975), Tsuruta (2005), Chitrakar et al. (2001)).
 - *L'énergie de fusion à partir des réserves de lithium.* La densité énergétique du lithium naturel est d'environ 7 500 kWh par gramme (Ongena et Van Oost, 2006). Il y a des variations considérables d'une estimation à l'autre sur le rendement de conversion de cette énergie en électricité par les réacteurs à fusion, allant de 310 kWh(e)/g (Eckhardt, 1995) à 3 400 kWh(e)/g de lithium naturel (Steinberg et Dang, 1975). J'ai pris comme valeur 2 300 kWh(e)/g, car c'est le chiffre-résumé le plus largement repris dans la littérature : « Une centrale à fusion de 1 GW consommera environ 100 kg de deutérium et 3 tonnes de lithium naturel par an, générant environ 7 milliards de kWh. » [69vt8r], [6oby22], [63121p].
- Pour en savoir plus sur la fission : Hodgson (1999), Nuttall (2004), Rogner (2000), Williams (2000). Uranium Information Center — www.uic.com.au. www.world-nuclear.org, [wnchw].
 Sur les coûts : Zaleski (2005).
 Sur les entrepôts de déchets : [shrln].
 Sur les surgénérateurs et le thorium : www.energyfromthorium.com.

Pour en savoir plus au sujet de la fusion : www.fusion.org.uk, www.askmar.com/Fusion.html.

25 Vivre sur les renouvelables d'autres pays ?

Que la Méditerranée devienne un espace de coopération ou de confrontation durant le 21^e siècle sera d'une importance stratégique pour notre sécurité commune.

Joschka Fischer, ministre allemand des Affaires étrangères, février 2004

Nous sommes arrivés à la conclusion qu'il était difficile de remplacer les combustibles fossiles que nous consommons par des énergies renouvelables disponibles chez nous. Le nucléaire pose aussi des problèmes spécifiques. Que pouvons-nous faire d'autre ? Eh bien, pourquoi ne pas vivre sur les renouvelables de quelqu'un d'autre ? (Ce n'est pas que nous ayons un quelconque droit sur les renouvelables de ce quelqu'un d'autre, bien sûr, mais peut-être trouverait-il un intérêt à nous les vendre.)

La plupart des ressources permettant de vivre de manière durable sont liées à la superficie de territoire qui y est dédiée : si vous voulez utiliser des panneaux solaires, vous avez besoin d'espace pour les installer ; si vous voulez faire pousser des cultures, vous avez encore besoin d'espace. Jared Diamond, dans son livre intitulé *Effondrement*, observe que, si de nombreux facteurs contribuent à l'effondrement de civilisations, il y a une caractéristique commune qu'on retrouve dans tous les effondrements, qui est que la densité de population humaine est devenue trop élevée.

Des endroits comme la Grande-Bretagne ou l'Europe sont dans le pétrin parce que la densité de population qu'ils hébergent est trop importante, et que toutes les énergies renouvelables disponibles sont diffusées — elles ont une faible densité de puissance (tableau 25.1). Si on veut demander de l'aide, on devrait se tourner vers des pays qui réunissent les trois

Région	Population	Superficie (km ²)	Densité (hab./km ²)	Surface par habitant (m ²)
Libye	5 760 000	1 750 000	3	305 000
Kazakhstan	15 100 000	2 710 000	6	178 000
Arabie saoudite	26 400 000	1 960 000	13	74 200
Algérie	32 500 000	2 380 000	14	73 200
Soudan	40 100 000	2 500 000	16	62 300
Monde	6 440 000 000	148 000 000	43	23 100
Écosse	5 050 000	78 700	64	15 500
France (+ DOM-TOM)	65 800 000	675 000	97	10 260
Union européenne	496 000 000	4 330 000	115	8 720
Pays de Galles	2 910 000	20 700	140	7 110
Royaume-Uni	59 500 000	244 000	243	4 110
Angleterre	49 600 000	130 000	380	2 630

PUISSANCE PAR UNITÉ DE SURFACE DE TERRES OU D'EAU	
Éolien	2 W/m ²
Éolien offshore	3 W/m ²
Bassins marémoteurs	3 W/m ²
Courants de marées	6 W/m ²
Photovoltaïque	5–20 W/m ²
Plantes	0,5 W/m ²
Eau de pluie (montagnes)	0,24 W/m ²
Hydroélectricité	11 W/m ²
Cheminées solaires	0,1 W/m ²
Solaire à concentration (déserts)	15 W/m²

TABLEAU 25.1. Les installations de renouvelables doivent être à l'échelle d'un pays tellement chacune des sources d'énergie renouvelable est diffuse.

TABLEAU 25.2. Quelques pays ou régions du monde, triés par densité de population croissante. Voir la page 397 pour trouver d'autres densités de population.

critères suivants : *a)* une faible densité de population, *b)* une grande superficie, et *c)* une disponibilité d'énergie renouvelable avec une densité de puissance élevée.

Le tableau 25.2 met en évidence quelques pays qui font l'affaire. La densité de population de la Libye, par exemple, est près de 75 fois plus faible que celle du Royaume-Uni, et sa surface est 7 fois plus grande. Parmi les autres pays richement dotés en superficie, on trouve le Kazakhstan, l'Arabie saoudite, l'Algérie et le Soudan.

Dans tous ces pays, je pense que l'énergie renouvelable la plus prometteuse est l'énergie solaire, en particulier l'énergie *solaire à concentration*, qui utilise des miroirs ou des lentilles pour concentrer la lumière du Soleil. Il y a plusieurs types de centrales solaires à concentration, selon la manière dont sont disposés et orientés leurs miroirs déplaçables, et les différentes technologies de conversion de la chaleur au foyer — moteurs Stirling, eau pressurisée ou sels fondus, par exemple — mais elles produisent toutes des puissances moyennes par unité de surface assez semblables, de l'ordre de 15 W/m^2 .

Une technologie avec laquelle le compte est bon

« Toute la puissance dont le monde a besoin pourrait être produite dans le Sahara par un carré de 100 kilomètres de côté. » C'est vrai, ça ? Installé dans le désert, le solaire à concentration fournit une puissance moyenne par unité de surface d'environ 15 W/m^2 . Donc si on s'interdit tout espace libre pour quoi que ce soit d'autre dans un tel carré, la puissance fournie serait de 150 GW. C'est *très loin* de correspondre à la puissance que consomme actuellement le monde. Ce n'est même pas une valeur poche de la seule consommation mondiale d'électricité, qui est de 2 000 GW. Aujourd'hui, la consommation mondiale de puissance, toutes sources d'énergies confondues, est de 15 000 GW. Donc pour être correcte, l'affirmation au sujet de la puissance provenant du Sahara aurait dû être qu'aujourd'hui, la consommation mondiale pourrait être fournie par un carré de désert de $1\,000 \text{ km}$ par $1\,000 \text{ km}$ consacré uniquement à l'énergie solaire à concentration. C'est quatre fois la superficie du Royaume-Uni, ou deux fois celle de la France. Et si ce qui nous intéresse, c'est de vivre dans un monde équitable, il faudrait probablement avoir pour objectif de fournir plus de puissance que ce que nous consommons *aujourd'hui*. Pour alimenter chaque personne dans le monde avec un niveau de consommation de puissance équivalent à la moyenne européenne (125 kWh/j), la superficie nécessaire serait de *deux* carrés de $1\,000 \text{ km}$ par $1\,000 \text{ km}$ dans le désert.

Heureusement, le Sahara n'est pas le seul désert au monde. Aussi peut-être serait-il plus pertinent de découper le monde en régions plus petites, et se demander quelle surface de désert local serait nécessaire pour chaque région. Si on se concentre sur l'Europe, « quelle superficie du Sahara du nord serait nécessaire pour alimenter *toute la population d'Europe et d'Afrique*



FIGURE 25.3. Moteurs Stirling à parabole. Ces magnifiques concentrateurs fournissent une puissance par unité de surface de 14 W/m^2 . Photo gracieusement fournie par Stirling Energy Systems. www.stirlingenergy.com



FIGURE 25.4. Andasol — une centrale solaire de « 100 MW » en construction en Espagne. L'énergie thermique en excès produite durant le jour est stockée dans des réservoirs de sels fondus pendant une durée maximum de 7 heures, permettant une fourniture stable et continue de puissance au réseau électrique. La centrale est prévue pour produire 350 GWh par an (40 MW). Les miroirs paraboliques occupent 400 hectares, et leur puissance par unité de surface sera de 10 W/m^2 . Photo du haut : ABB. Photo du bas : IEA SolarPACES.

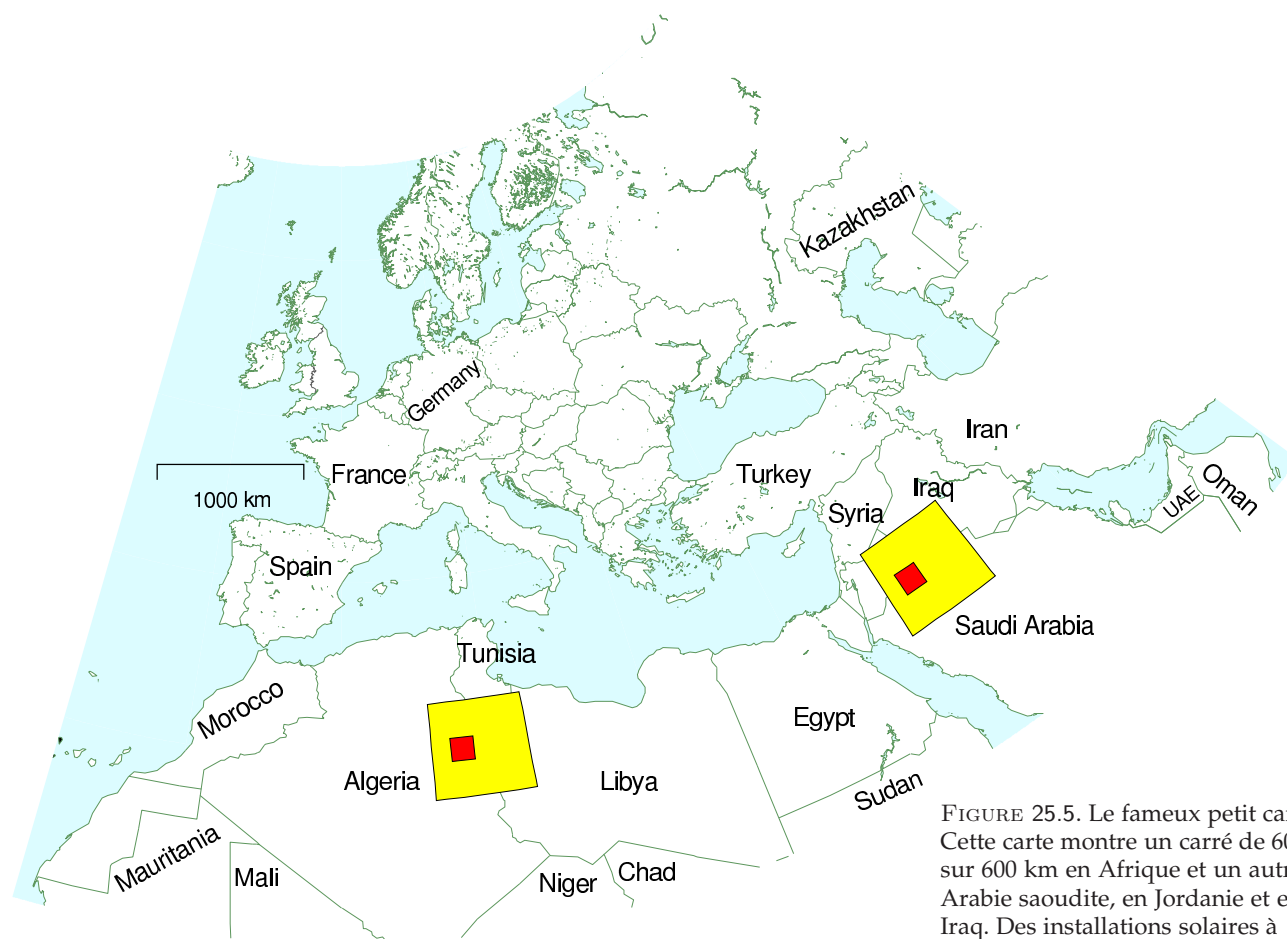


FIGURE 25.5. Le fameux petit carré. Cette carte montre un carré de 600 km sur 600 km en Afrique et un autre en Arabie saoudite, en Jordanie et en Iraq. Des installations solaires à concentration remplissant complètement l'un de ces carrés fournirait assez de puissance pour qu'un milliard de personnes puissent disposer de la consommation d'un Européen moyen, soit 125 kWh/j. La superficie couverte par un carré est la même que celle de l'Allemagne, ou 16 fois celle du Pays de Galles. A l'intérieur de chaque grand carré est dessiné un plus petit carré de 145 km sur 145 km indiquant la surface qu'il faudrait dans le Sahara — un pays de Galles, ou quatre départements français — pour alimenter toute la consommation de puissance britannique.

du nord avec un niveau de consommation de puissance d'un Européen moyen ? » Si on prend un milliard de personnes comme population d'Europe et d'Afrique du Nord réunies, la superficie nécessaire n'est plus que de 340 000 km², ce qui correspond à un carré de **600 km par 600 km**. Cette surface correspond à celle de l'Allemagne, **deux tiers de celle de la France**, à 1,4 fois le Royaume Uni, ou à 16 fois le Pays de Galles.

La part de désert nécessaire à l'actuelle consommation du Royaume-Uni correspondrait à la superficie du Pays de Galles, soit un carré de 145 km par 145 km dans le Sahara. Ces carrés sont représentés dans la figure 25.5. Remarquez que si ces carrés jaunes paraissent « petits » comparés à l'Afrique, ils ont quand même la même surface que l'Allemagne.

Le projet DESERTEC

Une organisation appelée DESERTEC [www.desertec.org] défend un projet utilisant l'énergie solaire à concentration des pays méditerranéens enso-

Pays	Potentiel économique (TWh/an)	Potentiel côtier (TWh/an)
Algérie	169 000	60
Libye	140 000	500
Arabie saoudite	125 000	2 000
Egypte	74 000	500
Iraq	29 000	60
Maroc	20 000	300
Oman	19 000	500
Syrie	10 000	0
Tunisie	9 200	350
Jordanie	6 400	0
Yémen	5 100	390
Israël	3 100	1
UEA	2 000	540
Koweït	1 500	130
Espagne	1 300	70
Qatar	800	320
Portugal	140	7
Turquie	130	12
Total	620 000 (70 000 GW)	6 000 (650 GW)

leillés et des lignes à haute tension en courant continu (HTCC), pour transporter de la puissance vers les régions plus nuageuses et septentrionales (figure 25.7). La technologie des lignes HTCC est utilisée depuis 1954 pour transmettre de la puissance électrique, aussi bien avec des lignes aériennes que sous-marines (comme l’interconnexion entre la France et l’Angleterre, par exemple). Elle est déjà utilisée pour transmettre de la puissance sur des distances supérieures à 1 000 km, en Afrique du Sud, en Chine, en Amérique, au Canada, au Brésil ou au Congo. Une ligne typique de 500 kV peut transmettre une puissance de 2 GW. Au Brésil, il existe une paire de lignes HTCC qui transmet 6,3 GW.

Les lignes HTCC sont préférées aux traditionnelles lignes à haute tension en courant alternatif (HTCA) car elles nécessitent moins de matériel, utilisent moins de place au sol, et ont moins de pertes de puissance en ligne. Les pertes de puissance sur une ligne de 3 500 kilomètres, en prenant en compte la conversion du courant alternatif en courant continu et inversement, sont d’environ 15 %. Un autre avantage des systèmes HTCC est qu’ils facilitent la stabilisation des réseaux électriques auxquels ils sont connectés.

Dans les plans de DESERTEC, les premières régions à exploiter seraient les zones côtières, car les centrales solaires à concentration proches de la

TABEAU 25.6. Potentiel de puissance solaire dans les pays autour et proches de l’Europe, tel qu’estimé par DESERTEC.

Le « potentiel économique » est la puissance qui pourrait être générée dans des endroits où l’irradiance directe normale est supérieure à 2 000 kWh/m²/an.

Le « potentiel côtier » est la puissance qui pourrait être générée jusqu’à 20 mètres d’altitude au dessus du niveau de la mer. Une telle puissance est prometteuse du fait, en particulier, de la possibilité de la combiner au dessalement de l’eau de mer.

A titre de comparaison, la puissance totale nécessaire pour fournir 125 kWh par jour à 1 milliard de personnes est de 46 000 TWh/an (5 200 GW). 6 000 TWh/an (650 GW) représentent 16 kWh par jour et par personne pour 1 milliard de personnes.



FIGURE 25.7. Pose d’une ligne à haute tension en courant continu entre la Finlande et l’Estonie. Une paire de ces câbles transmet une puissance de 350 MW. Photo : ABB.

mer peuvent fournir de l'eau de mer dessalée sous forme de sous-produit — qui est précieuse aussi bien pour la consommation humaine que pour l'agriculture.

Le tableau 25.6 montre les estimations de DESERTEC sur le potentiel de puissance pouvant être produite en Europe et en Afrique du nord. Le « potentiel économique » dépasse largement le besoin nécessaire pour fournir 125 kWh par jour et par personne à 1 milliard de personnes. Le total du « potentiel côtier » est suffisant pour fournir 16 kWh par jour et par personne à 1 milliard de personnes.

Essayons de mettre sur une carte ce à quoi pourrait ressembler un plan réaliste. Imaginons des installations solaires ayant chacune une superficie de 1 500 km², soit approximativement la taille de Londres. (Le Grand Londres a une superficie de 1 580 km² ; l'autoroute circulaire M25, appelée « *London Orbital* » et qui fait le tour de Londres, ceint une région d'une superficie de 2 300 km².) Appelons chacune de ces installations une *tache*. Imaginons que dans chacune de ces taches, la moitié de la superficie soit consacrée à des centrales solaires à concentration avec une densité de puissance moyenne de 15 W/m², en laissant le reste de l'espace pour l'agriculture, les bâtiments, les voies de chemins de fer, les routes, les canalisations et les câbles. En s'autorisant 10 % de pertes entre la tache et le consommateur, chacune de ces taches génère une puissance moyenne de 10 GW. La figure 25.8 montre quelques taches pour donner l'échelle. Pour donner une idée de la taille de ces taches, j'en ai aussi placé quelques-unes sur la Grande-Bretagne. *Quatre* de ces taches pourraient produire grosso modo la puissance nécessaire à la consommation totale d'électricité de la Grande-Bretagne (16 kWh/j par personne pour 60 millions de personnes). *Soixante-cinq* taches pourraient alimenter un milliard de personnes en Europe et en Afrique du nord avec 16 kWh/j par personne. La figure 25.8 montre 68 taches dans le désert.

Systèmes photovoltaïques à concentration

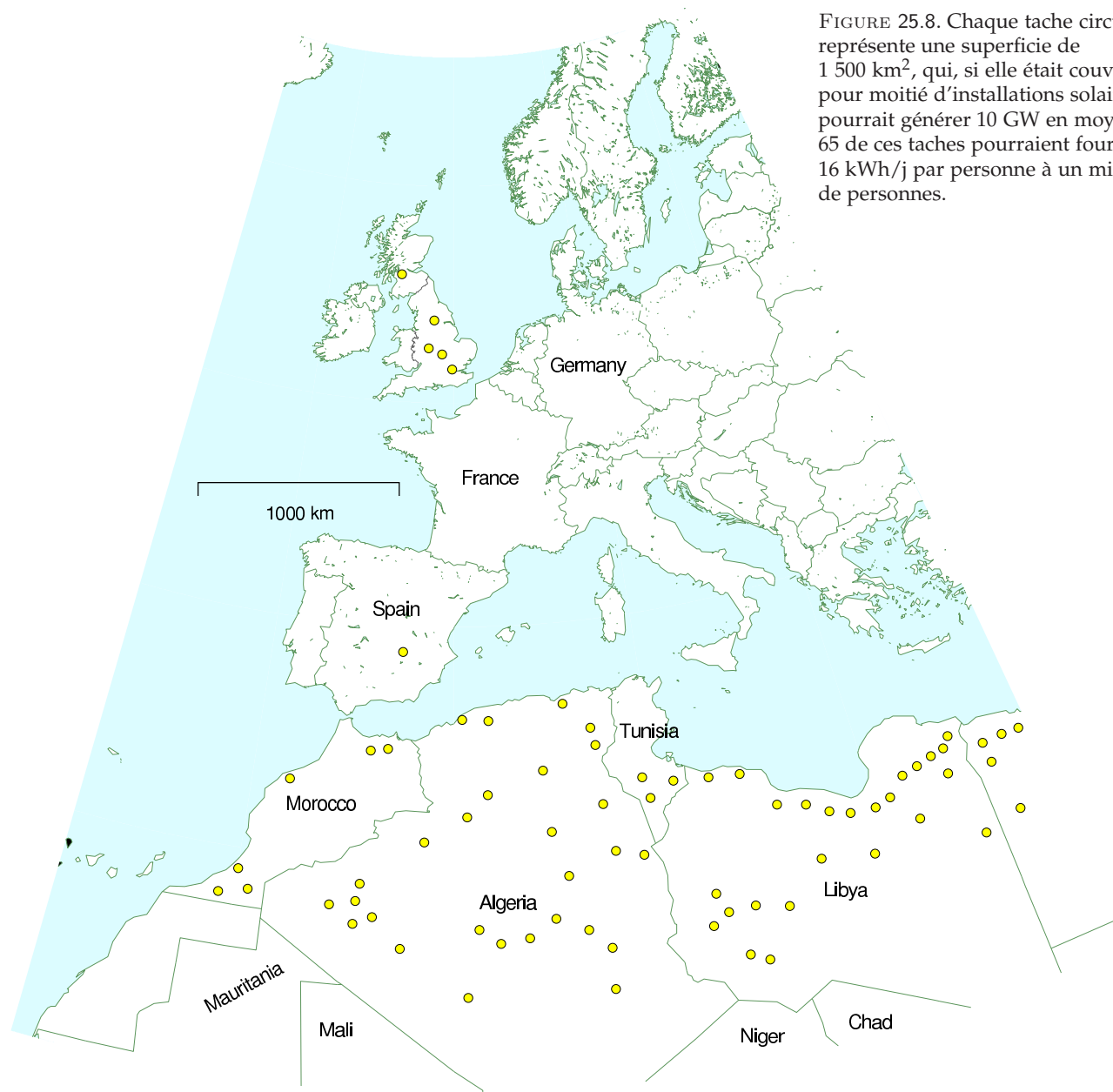
Une alternative aux centrales thermiques solaires à concentration dans les déserts, ce sont les systèmes photovoltaïques à concentration de grande dimensions. Pour en construire un, on place une cellule photovoltaïque de haute qualité au foyer de miroirs ou de lentilles bon marché. Faiman et al. (2007) affirme que « l'énergie solaire, dans sa variante photovoltaïque à concentration, peut être tout à fait compétitif face aux combustibles fossiles [dans les États possédant des déserts, comme la Californie, l'Arizona, le Nouveau-Mexique et le Texas], sans avoir besoin de subvention d'aucune sorte. »

Selon le fabricant Amonix, cette forme de solaire à concentration produirait une puissance moyenne par unité de surface au sol de 18 W/m².

Une autre manière d'avoir une idée de la taille de l'installation nécessaire qu'il faudrait, c'est de ramener les choses à l'échelle d'une personne.



FIGURE 25.9. Un collecteur photovoltaïque à concentration de 25 kW (crête) produit par la société californienne Amonix. Son ouverture de 225 m² contient 5 760 lentilles de Fresnel avec une concentration optique d'un rapport 260, chacune illuminant une cellule de silicium au rendement de 25 %. Un tel collecteur, placé sur un site désertique approprié, génère 138 kWh par jour — assez pour couvrir la consommation d'énergie de la moitié d'un Américain. Remarquez l'homme en bas qui donne l'échelle. Photo de David Faiman.



Un seul de ces collecteurs de « 25 kW » (crête) que montre la figure 25.9 génère en moyenne environ 138 kWh par jour ; le niveau de vie américain actuel nécessite 250 kWh par jour et par personne. Donc pour débarrasser les États-Unis des combustibles fossiles en utilisant l'énergie solaire, il nous faut en gros deux de ces collecteurs de 15 m × 15 m par personne.

Interrogations

Je ne comprends pas ! Dans le chapitre 6, vous disiez que les panneaux photovoltaïques fournissaient en moyenne une puissance de 20 W/m² dans un endroit ensoleillé comme la Grande-Bretagne. On pourrait s'attendre à ce que, dans le désert, les mêmes panneaux fournissent 40 W/m². Alors comment se fait-il que des centrales solaires à concentration ne puissent fournir que 15 à 20 W/m² ? Sûrement le fait de concentrer la puissance lumineuse devrait être encore meilleur que d'utiliser de simples panneaux plats, non ?

Bonne question. Et la réponse, version courte, est non. Concentrer l'énergie solaire n'augmente en rien la puissance par unité de surface par rapport à ce qu'on obtient avec des panneaux plats. Le système de concentration doit suivre le Soleil ; sinon, la lumière du Soleil ne sera pas correctement concentrée. Mais une fois que vous commencez à remplir le terrain de systèmes de suivi du Soleil, vous devez laisser de l'espace entre eux, et une bonne partie de la lumière solaire passe entre les trous, et se perd. La raison pour laquelle on utilise malgré tout des systèmes à concentration, c'est qu'aujourd'hui, les panneaux photovoltaïques plats coûtent très cher, et que les systèmes de concentration le sont moins. Le but des gens qui utilisent la concentration de la lumière solaire n'est pas de réaliser des installations avec une grande puissance par unité de surface. La surface de terrain est bon marché (supposent-ils). Leur objectif est de produire beaucoup de puissance pour chaque dollar investi.

Mais si les panneaux plats ont une densité de puissance plus élevée, pourquoi n'envisagez-vous pas d'en couvrir le désert du Sahara ?

Parce que je suis en train de parler des possibilités pratiques pour une production de puissance durable à grande échelle pour l'Europe et l'Afrique du nord d'ici 2050. Et je pense qu'en 2050, les miroirs seront toujours moins chers que les panneaux photovoltaïques. C'est pour cela que le solaire à concentration est, des deux, la technologie sur laquelle nous devrions nous concentrer.

Et des cheminées solaires ?

Une cheminée solaire, appelée également cheminée provençale ou cheminée thermique, utilise la puissance solaire d'une manière très simple. Une immense cheminée est construite au centre d'une zone couverte d'un toit transparent en verre ou en plastique. Parce que l'air chaud monte, l'air

chaud créé par ce collecteur de chaleur qui fonctionne comme une serre, est attiré puis remonte par la cheminée par convection, attirant de l'air plus frais vers le périmètre du collecteur de chaleur. La puissance est extraite du courant d'air par des turbines situées à la base de la cheminée. Les cheminées solaires sont assez simples à construire, mais elles ne fournissent pas une puissance très importante par unité de surface. Une centrale pilote à Manzanares en Espagne a fonctionné pendant sept ans, entre 1982 et 1989. La cheminée avait une hauteur de 195 mètres et un diamètre de 10 mètres; le collecteur avait un diamètre de 240 mètres, et son toit était composé de 6 000 m² de verre et 40 000 m² de plastique transparent. Elle produisait 44 MWh par an, ce qui correspond à une puissance par unité de surface de 0,1 W/m². En théorie, plus le collecteur est grand et plus la cheminée est haute, plus la densité de puissance produite est importante. Suite à l'expérience du projet Manzanares, les ingénieurs ont estimé que, sur un site avec un rayonnement solaire de 2 300 kWh/m² par an (262 W/m²), une tour de 1 000 mètres de haut entourée d'un collecteur de 7 kilomètres de diamètre pourrait générer 680 GWh par an, soit une puissance moyenne de 78 MW. Cela fait une puissance par unité de surface d'environ 1,6 W/m², semblable à la puissance par unité de surface des fermes éoliennes en Grande-Bretagne, et à un dixième de la puissance par unité de surface que, nous l'avons vu précédemment, fourniraient des centrales solaires à concentration. Certains prétendent que les cheminées solaires pourraient produire de l'électricité à un prix semblable à celui des centrales thermiques conventionnelles. Je suggère que les pays qui ont suffisamment d'espace et de soleil à revendre accueillent un grand concours du meilleur cuistot, financé par les pays producteurs et consommateurs de pétrole, et qui verrait s'affronter cheminées solaires et centrales solaires à concentration.



FIGURE 25.10. Le prototype de cheminée solaire de Manzanares. Photos de solarmillennium.de.

Et si on récupérait l'énergie de l'Islande, où géothermie et hydroélectricité sont si abondantes ?

En effet, l'Islande exporte déjà de l'énergie, en alimentant des industries qui fabriquent des biens intensifs en énergie. Par exemple, l'Islande produit près d'une tonne d'aluminium par habitant et par an ! Du point de vue de ce pays, il y a donc de grands profits à réaliser. Mais l'Islande peut-elle vraiment sauver l'Europe ? Franchement, je serais surpris si la production de puissance islandaise pouvait atteindre un niveau suffisant pour pouvoir exporter de confortables quantités d'électricité, ne serait-ce qu'à destination de la Grande-Bretagne. Comme point de référence, prenons l'Interconnexion électrique entre la France et l'Angleterre, qui peut fournir jusqu'à 2 GW à travers la Manche. Cette puissance maximum est équivalente à 0,8 kWh par jour et par personne au Royaume-Uni, soit environ 5 % de la consommation d'électricité moyenne britannique. La production moyenne d'électricité d'origine géothermique en Islande n'est que de 0,3 GW, c'est-à-dire moins de 1 % de la consommation moyenne d'électri-



FIGURE 25.11. Plus de puissance géothermique en Islande. Photo de Rosie Ward.

citée de la Grande-Bretagne. La production moyenne d'électricité islandaise est de 1,1 GW. Donc, pour créer une liaison et transmettre une puissance égale à celle de l'interconnexion avec la France, il faudrait que l'Islande multiplie par trois sa production d'électricité. Pour pouvoir nous fournir 4 kWh par jour et par personne (à peu près ce que la Grande-Bretagne obtient de ses propres centrales nucléaires), il faudrait que l'Islande multiplie par dix sa production d'électricité. Construire une interconnexion électrique entre la Grande-Bretagne et l'Islande est probablement une bonne idée, mais il ne faut pas s'attendre à ce qu'elle nous fournisse autre chose qu'une petite contribution.

Notes et bibliographie

Page n°

- 210 Dans le désert, le solaire à concentration fournit une puissance moyenne par unité de surface de terres d'environ 15 W/m^2 . Mes sources pour ce chiffre sont deux entreprises qui fabriquent des centrales solaires à concentration dans les déserts.

www.stirlingenergy.com affirme qu'un de ses panneaux paraboliques, équipé d'un moteur Stirling de 25 kW au foyer, peut générer 60 000 kWh par an sur un site désertique favorable. Les panneaux pourraient être accumulés à raison d'une parabole pour 500 m². Cela correspond à une puissance moyenne de 14 W/m^2 . Ils affirment également qu'en termes d'énergie fournie, ces paraboles solaires équipées de moteurs Stirling exploitent au mieux la surface de terres.

www.ausra.com utilise des miroirs plats pour chauffer de l'eau à 285 °C et faire tourner une turbine à vapeur. L'eau chaude sous pression peut être stockée en profondeur dans de profondes cavernes métalliques permettant de restituer de la puissance électrique durant la nuit. Dans leur description d'une centrale de « 240 MW(e) » proposée pour l'Australie (Mills et Lièvre, 2004), les concepteurs affirment que 3,5 km² de miroirs pourraient fournir 1,2 TWh(e), ce qui fait 38 W/m^2 de miroirs. Pour trouver la puissance par unité de surface, nous avons besoin de prendre en compte l'espace libre entre les miroirs. Ausra indique qu'il faut un carré de 153 km par 153 km dans le désert pour alimenter tous les besoins électriques des États-Unis (Mills et Morgan, 2008). Puisque la consommation totale d'électricité des États-Unis est de 3 600 TWh par an, ils affirment atteindre une puissance par unité de surface de 18 W/m^2 . Cette technologie porte le nom de *réflecteur linéaire compact de Fresnel* (Mills et Morrison (2000) ; Mills et al. (2004) ; Mills et Morgan (2008)). Soit dit en passant, plutôt que « solaire à concentration », la société Ausra préfère utiliser l'expression « *électricité solaire thermique* » (« *solar thermal electricity* » ou STE) ; ils insistent sur les avantages du stockage thermique par rapport au photovoltaïque à concentration, qui ne s'accompagne pas d'une possibilité naturelle de stockage.

Trieb et Knies (2004), fervent partisan du solaire à concentration, estime que les technologies alternatives de solaire à concentration pourraient produire de la puissance par unité de surface dans les fourchettes suivantes : miroirs



FIGURE 25.12. Deux techniciens en train d'assembler une centrale solaire à concentration eSolar utilisant des héliostats (des miroirs qui tournent et s'orientent pour suivre la course du Soleil). eSolar.com fabrique des centrales à taille intermédiaire : une unité de génération de 33 MW (crête) sur un site de 64 hectares. Cela représente 51 W/m^2 en crête. J'en déduis donc que dans un site désertique typique, cette unité fournirait environ un quart de cette valeur : 13 W/m^2 .

paraboliques, 14–19 W/m²; collecteurs linéaires, de Fresnel 19–28 W/m²; tours équipées d'héliostats, 9–14 W/m²; paraboles de Stirling, 9–14 W/m².

Il existe en Europe trois démonstrateurs solaires à concentration. Andasol — qui utilise des collecteurs paraboliques; Solúcar PS10, une tour près de Séville; et Solar Tres, une tour qui utilise des sels fondus pour stocker la chaleur. Le système à miroirs paraboliques d'Andasol montré par la figure 25.4 est annoncé comme fournissant 10 W/m². La tour solaire Solúcar de « 11 MW » est équipée de 624 miroirs de 121 m² chacun. Les miroirs concentrent la lumière du Soleil en un rayonnement d'une densité pouvant atteindre 650 kW/m². Le récepteur reçoit une puissance crête de 55 MW. La centrale peut stocker 20 MWh d'énergie thermique, ce qui lui permet de continuer à produire pendant une période de nébulosité de 50 minutes. Il était prévu qu'elle produise 24,2 GWh d'électricité par an, et elle occupe 55 hectares. Cela correspond à une puissance moyenne par unité de surface de 5 W/m². (Source : Rapport annuel Abengo 2003.) Solartres occupera 142 hectares et il est prévu qu'elle produise 96,4 GWh par an, ce qui fait une densité de puissance de 8 W/m². Les centrales Andasol et Solar Tres utiliseront, toutes les deux, un peu de gaz naturel dans le cadre de leur fonctionnement normal.



FIGURE 25.13. Un système électrique haute tension en courant continu (HTCC) en Chine. Photo : ABB.

- 212 *La technologie des lignes HTCC est déjà utilisée pour transmettre l'électricité sur des distances de plus de 1 000 km en Afrique du Sud, en Chine, en Amérique, au Canada, au Brésil ou au Congo.* Sources : Asplund (2004), Bahrman et Johnson (2007). Pour en savoir plus sur la HTCC : Carlsson (2002).
- 212 *Les pertes de puissance sur une ligne HTCC de 3 500 km, en prenant en compte la conversion du courant alternatif en courant continu et inversement, sont d'environ 15 %.* Sources : Trieb et Knies (2004); van Voorthuysen (2008).
- 213 *Selon Amonix, cette forme de solaire à concentration pourrait avoir une puissance par unité de surface au sol de 18 W/m².* Les hypothèses de www.amonix.com sont les suivantes : la lentille transmet 85 % de la lumière, le rendement des cellules est de 32 %, celui du collecteur est de 25 %, et les autres pertes dues aux zones d'ombre de 10 %. Le ratio ouverture sur surface de sols est de 1/3. Irradiance normale directe : 2 222 kWh/m²/an. Ils s'attendent à ce que chaque kW de sa capacité en crête fournisse 2 000 kWh par an (soit une moyenne de 0,23 kW). Une centrale de 1 GW de capacité en crête occuperait 12 km² de terrain et fournirait 2 000 GWh par an, soit une densité de puissance de 18 W/m².
- 215 *Cheminées solaires.* Sources : Schlaich et Schiel (2001); Schlaich et al. (2005); Dennis (2006), www.enviromission.com.au, www.solarairpower.com.
- 217 *La production moyenne d'électricité d'origine géothermique en Islande n'est que de 0,3 GW. La production moyenne d'électricité islandaise est de 1,1 GW.* Il s'agit des statistiques pour 2006 : 7,3 TWh d'énergie hydroélectrique et 2,6 TWh d'électricité géothermique, avec des capacités de 1,16 GW et 0,42 GW, respectivement. Source : Orkustofnun National Energy Authority [www.os.is/page/energystatistics].

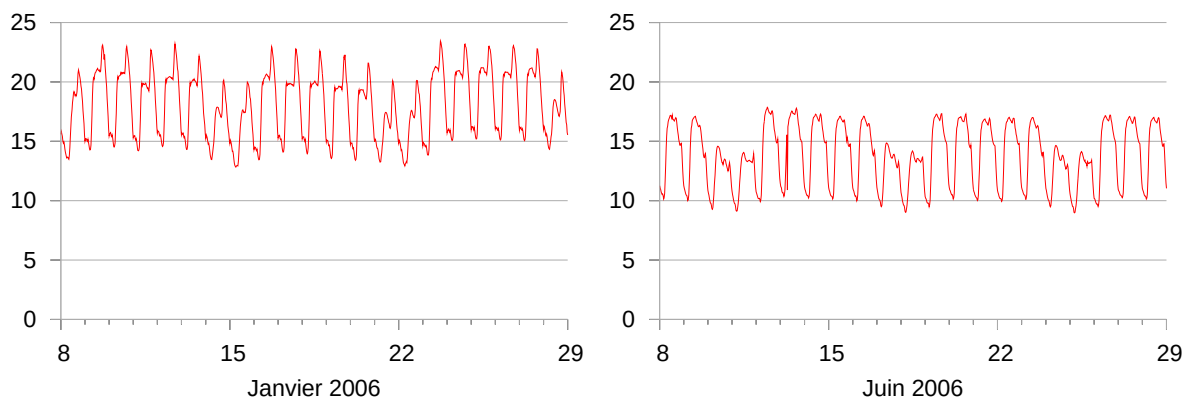
Pour en savoir plus : European Commission (2007), German Aerospace Center (DLR) Institute of Technical Thermodynamics Section Systems Analysis and

Technology Assessment (2006), www.solarmillennium.de.

26 Fluctuations et stockage

Le vent, en tant que puissance directement motrice, est entièrement inapplicable à un système de travail mécanisé, car durant une saison calme, toute l'activité du pays se retrouverait au point mort. Avant l'ère des machines à vapeur, on a essayé d'utiliser les moulins à vent pour assécher les mines ; mais si ces machines étaient puissantes, elles fonctionnaient de manière très irrégulière, de sorte que durant une longue période de temps calme, les mines étaient noyées, et tous les travailleurs se retrouvaient sans travail.

William Stanley Jevons, 1865



Si l'on décide de se débarrasser des combustibles fossiles et de se jeter à corps perdu dans les renouvelables, *ou bien* dans le nucléaire, *ou bien* dans quelque combinaison des deux que ce soit, on risque d'avoir un problème. Si allumer et arrêter la production d'électricité, c'est facile à faire avec des combustibles fossiles, ça n'est pas possible avec la plupart des gros renouvelables. Lorsque le vent souffle, et que le soleil donne, la puissance est là pour qui veut la prendre ; mais deux heures plus tard, elle peut ne plus être là du tout. Les centrales nucléaires ne sont généralement pas conçues pour être allumées et éteintes à la demande non plus. Elles sont généralement en route tout le temps, et la puissance qu'elles délivrent ne peut généralement être baissée ou remontée qu'en plusieurs heures. C'est un problème parce que, sur un réseau électrique, la consommation et la production doivent être parfaitement égales en permanence. Le réseau électrique ne peut pas *stocker* l'énergie. Pour disposer d'un plan énergétique dont le compte soit bon à chaque minute de la journée ou de la nuit, tous les jours de l'année, il nous faut donc *quelque chose qu'on puisse facilement allumer et éteindre à la demande*. On suppose le plus souvent que ce qu'on peut facilement allumer et éteindre, c'est une *source* de puissance, que l'on éteint et allume pour

FIGURE 26.1. Demande d'électricité en Grande-Bretagne (en kWh/j par personne) durant trois semaines d'hiver et trois semaines d'été en 2006. Les pics en janvier ont lieu à 18 heures chaque jour. Les cinq premiers jours de la semaine sont bien mis en évidence, aussi bien en été qu'en hiver. (Si vous voulez obtenir la demande nationale en GW, rappelez-vous que le haut de l'échelle, 24 kWh/j par personne, correspond à 60 GW par Royaume-Uni.)

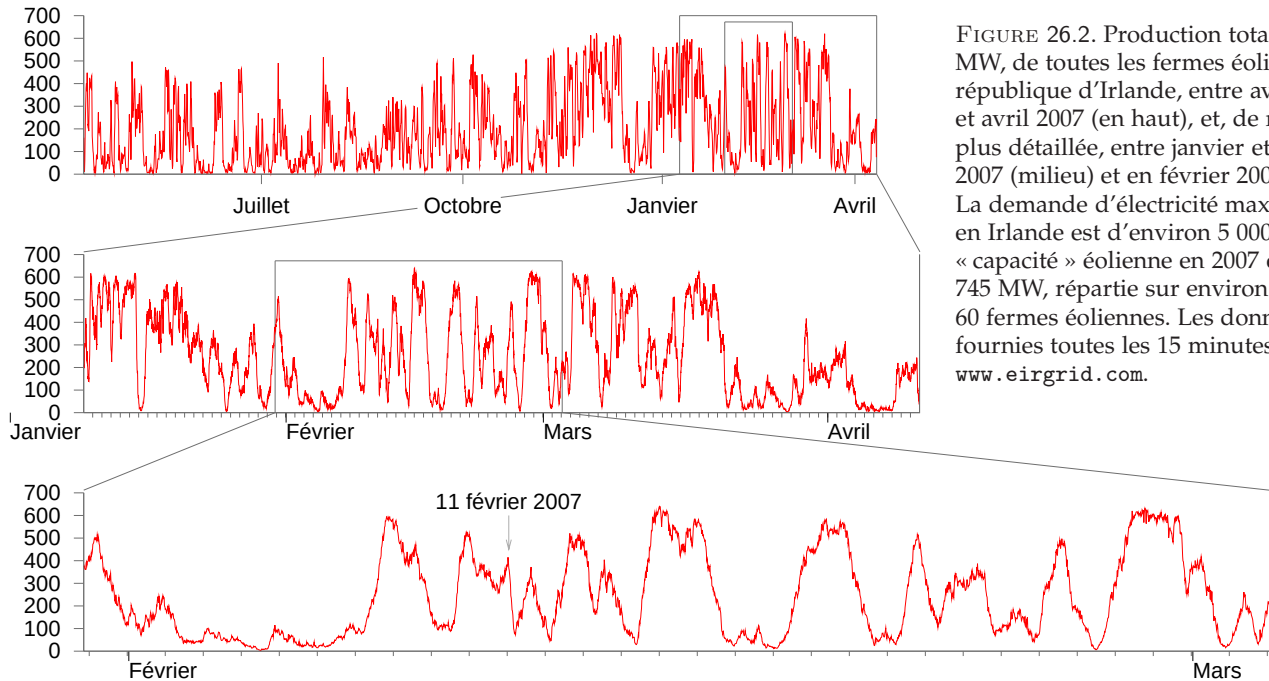


FIGURE 26.2. Production totale, en MW, de toutes les fermes éoliennes de république d'Irlande, entre avril 2006 et avril 2007 (en haut), et, de manière plus détaillée, entre janvier et avril 2007 (milieu) et en février 2007 (bas). La demande d'électricité maximum en Irlande est d'environ 5 000 MW. Sa « capacité » éolienne en 2007 était de 745 MW, répartie sur environ 60 fermes éoliennes. Les données sont fournies toutes les 15 minutes par www.eirgrid.com.

compenser les fluctuations de fourniture d'énergie qui sont relatives à la demande (par exemple, une centrale électrique qui brûle des combustibles fossiles !). Mais une autre manière tout aussi efficace de faire correspondre demande et fourniture d'énergie est d'avoir une *demande* de puissance qui soit facilement allumable et éteignable — en quelque sorte, un aspirateur à puissance qu'on pourrait arrêter et relancer d'un claquement de doigts.

L'un ou l'autre, ce quelque chose facile à allumer et à éteindre doit être *gros*, parce que la demande d'électricité varie beaucoup (figure 26.1). La demande peut parfois changer de manière significative en l'espace d'à peine quelques minutes. L'objet de ce chapitre, c'est de voir comment on peut gérer les fluctuations de fourniture et de demande sans utiliser de combustibles fossiles.

Jusqu'à quel point les renouvelables sont-ils intermittents ?

On a beau être fou d'amour pour les renouvelables, il ne faut pas se mentir : le vent fluctue, c'est une réalité.

Du côté des critiques de l'énergie éolienne, on entend dire : « La puissance du vent est intermittente et imprévisible. Elle ne peut donc pas apporter une quelconque contribution à la sécurité d'approvisionnement en énergie. Si on installe des tas d'éoliennes, il faudra ainsi maintenir des tas de centrales qui brûlent des combustibles fossiles, pour remplacer le vent quand il tombe. » Des gros titres du genre « la disparition du vent impose un plan d'urgence sur le réseau électrique du Texas » ne font que renforcer

ce genre de point de vue. Les tenants de l'éolien minimisent ce problème : « Ne vous inquiétez pas — les fermes éoliennes prises *individuellement* sont peut-être intermittentes, mais elles ne sont pas toutes situées au même endroit, donc prises *toutes ensemble*, elles sont beaucoup moins intermittentes. »

Jetons un coup d'œil aux vraies données, et essayons d'en déduire un point de vue équilibré. La figure 26.2 montre la production cumulée du parc éolien en république d'Irlande, entre avril 2006 et avril 2007. Clairement, le vent est *vraiment* intermittent, même si on couvre d'éoliennes le pays tout entier. Le Royaume-Uni est un peu plus grand que l'Irlande, mais on y retrouve le même problème. Entre octobre 2006 et février 2007, il y a eu 17 jours où la production cumulée des 1 632 fermes éoliennes de Grande-Bretagne était de moins de 10 % de leur capacité théorique. Sur cette période, il y a eu cinq jours où la production était de moins de 5 % de la capacité, et un jour où elle n'était que de 2 %.

Essayons de quantifier les fluctuations de l'éolien à l'échelle du pays. Les deux problèmes sont les variations rapides et les longues périodes de calme. Cherchons la variation la plus rapide en un mois dans les données de vent irlandaises. Le 11 février 2007, la puissance éolienne d'Irlande s'est effondrée, passant de 415 MW à minuit à 79 MW à 4 heures du matin. Ce qui fait un taux de variation de 84 MW par heure pour le parc d'un pays entier, d'une capacité de 745 MW. Par taux de variation, j'entends le rythme auquel la puissance fournie baisse ou augmente — c'est la pente de la courbe dans le graphique du 11 février.) OK : si on dimensionne la puissance de l'éolien en Grande-Bretagne à une capacité de 33 GW (de sorte qu'il puisse fournir 10 GW en moyenne), on peut s'attendre, occasionnellement, à des taux de variations de :

$$84 \text{ MW/h} \times \frac{33\,000 \text{ MW}}{745 \text{ MW}} = 3\,700 \text{ MW/h},$$

en supposant que la Grande-Bretagne soit comme l'Irlande. Il nous faut donc être capable, soit de fournir de quoi *remplacer* le vent à un rythme de 3,7 GW par heure — c'est l'équivalent de 4 centrales nucléaires qui passent de l'état « complètement éteint » à l'état « à pleine puissance » chaque heure — soit de *couper* brutalement une partie de notre *demande*, toujours à un rythme de 3,7 GW par heure.

Voilà des exigences qui ne manquent pas de souffle ! Est-ce qu'on peut les satisfaire ? Pour répondre à cette question, il nous faut parler un peu plus de « gigawatts ». Les gigawatts sont des unités de puissance énormes, qui sont à l'échelle d'un pays. Ils sont à un pays ce que le kilowatt-heure par jour est à une personne : une unité facile et bien pratique. La consommation moyenne d'électricité au Royaume-Uni est d'environ 40 GW. On peut faire un lien entre ce chiffre national et la consommation personnelle : 1 kWh par jour et par personne est équivalent à 2,5 GW au niveau national. Donc si chaque personne consomme 16 kWh par jour d'électricité, alors la consommation nationale est de 40 GW.

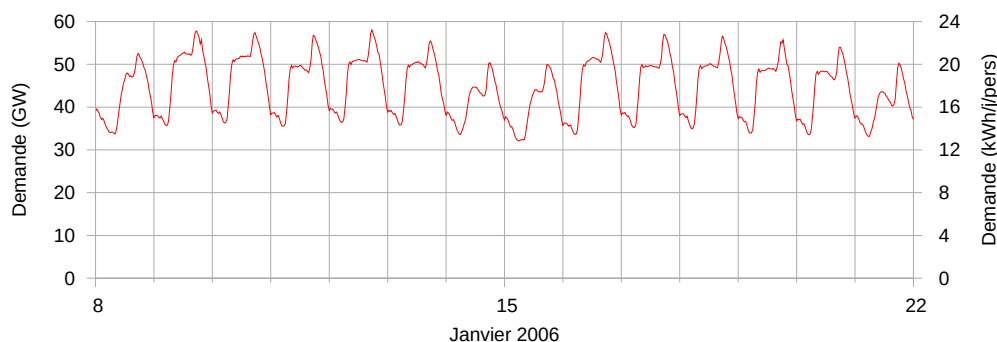


FIGURE 26.3. Demande d'électricité en Grande-Bretagne durant deux semaines d'hiver en 2006. Les échelles de gauche et de droite montrent la demande, exprimée respectivement dans les unités nationales (GW) et dans les nôtres (kWh/j par personne). Ce sont les mêmes données que dans la figure 26.1.

Un taux de variation de **4 GW par heure** est-il totalement au-delà de toute expérience humaine? Non. Chaque matin, comme le montre la figure 26.3, la demande britannique grimpe d'environ 13 GW entre 6 heures et demi et 8 heures et demi. Cela fait un taux de variation de **6,5 GW par heure**. Donc nos puissants ingénieurs font déjà face, tous les jours, à des taux de variation plus grands que 4 GW par heure sur le réseau électrique national. Y ajouter 4 GW par heure supplémentaires, provoqués par des variations de vent soudaines, n'est pas donc une bonne raison pour jeter à la poubelle l'idée de fermes éoliennes à l'échelle du pays entier. C'est un problème du même genre que ceux que les ingénieurs ont déjà résolus. Il nous faut simplement trouver comment faire correspondre une fourniture et une demande qui changent sans arrêt sur un réseau sans combustibles fossiles. Je ne dis pas que le problème des fluctuations du vent est déjà résolu — juste que c'est un problème du même ordre que ceux qui ont *déjà* été résolus.

Mais avant de commencer à chercher des solutions, il nous faut quantifier les autres problèmes qui touchent au vent : les longues périodes de calme. Au début du mois de février 2007, l'Irlande a connu une de ces périodes calmes, qui a duré cinq jours. Ce n'était pas un événement exceptionnel, comme vous pouvez le voir sur la figure 26.2. Des périodes de deux ou trois jours de calme arrivent plusieurs fois par an.

Il y a deux manières de faire face aux périodes de calme. Soit on stocke de l'énergie quelque part avant le calme, soit il faut qu'on trouve un moyen de réduire la demande pendant toute la période de calme. (Soit un mélange des deux.) Si on a 33 GW d'éoliennes qui fournissent une puissance moyenne de 10 GW, alors la quantité d'énergie, soit qu'il nous faut pouvoir stocker par avance, soit dont il faut être capable de se passer, est, durant une période de calme de cinq jours, de :

$$10 \text{ GW} \times (5 \times 24 \text{ h}) = 1\,200 \text{ GWh.}$$

(Le gigawatt-heure (GWh) est l'unité d'énergie favorite pour les pays entiers. La consommation d'électricité de la Grande-Bretagne est d'environ 1 000 GWh par jour.)

Pour ramener cette quantité à l'échelle individuelle, une provision d'énergie de 1 200 GWh pour le pays entier est équivalente à une provision d'énergie de 20 kWh par personne. Une telle réserve d'énergie permettrait au pays de se passer de 10 GW d'électricité pendant 5 jours ; ou, de la même manière, à chaque personne du pays de se passer de 4 kWh par jour d'électricité pendant 5 jours.

Faire face aux périodes de calme et aux variations courtes

Il nous faut résoudre deux problèmes — les périodes de calme (les longues périodes avec une production renouvelable petite) et les variations courtes (les changements rapides de fourniture et de demande). Nous avons quantifié ces problèmes, en supposant que la Grande-Bretagne avait en gros 33 GW d'éolien. Pour gérer les périodes de calme, il nous faut être capable de stocker à peu près 1 200 GWh d'énergie (20 kWh par personne) de manière efficace. Et le taux de variation auquel nous devons être capable de faire face est de **6,5 GW par heure** (ou 0,1 kWh par heure et par personne).

Il y a deux solutions, qui pourraient toutes les deux résoudre ces deux problèmes à la bonne échelle. La première est une solution centralisée, et la seconde est décentralisée. La première solution stocke de l'énergie, puis fait face aux fluctuations en allumant et en arrêtant une *source* alimentée par la réserve d'énergie constituée. La seconde solution repose sur la possibilité d'allumer et d'arrêter une partie de la *demande*.

La première solution, c'est le *stockage par pompage*. La seconde utilise les batteries des véhicules électriques dont nous avons parlé dans le chapitre 20. Mais avant de décrire ces solutions, parlons d'abord de quelques autres idées pour faire face aux variations courtes.

Autres manières de faire face aux variations, du côté de la fourniture

Il y a certains renouvelables que l'on peut allumer et éteindre à la demande. Si on pouvait disposer de beaucoup de renouvelables faciles à allumer et à éteindre, tous les problèmes de ce chapitre seraient résolus. Des pays comme la Norvège ou la Suède ont de grandes et profondes installations hydroélectriques, qu'ils peuvent facilement démarrer et arrêter. Quelles pourraient être les possibilités pour la Grande-Bretagne ?

Tout d'abord, la Grande-Bretagne pourrait installer de nombreux incinérateurs de déchets et de biomasse — des centrales qui jouent le même rôle que celui aujourd'hui joué par les centrales à combustibles fossiles. Si ces centrales étaient conçues pour être faciles à démarrer et à arrêter, cela aurait des conséquences sur leur coût, tout comme le fait d'avoir des centrales à combustibles fossiles qui ne fonctionnent qu'une partie du temps à un coût : leurs générateurs se retrouveraient parfois inactifs et parfois à devoir fonctionner deux fois plus ; et la plupart des générateurs ne sont

pas aussi efficaces si vous passez votre temps à augmenter et baisser leur puissance plutôt qu'à les laisser fonctionner à un régime constant. OK, si on laisse les coûts de côté, la question cruciale est celle-ci : quelle taille pourrait atteindre une ressource facile à allumer et à éteindre ? Si tous les déchets municipaux étaient incinérés, et qu'une quantité égale de déchets agricoles l'étaient aussi, alors la puissance moyenne obtenue à partir de ces sources serait d'environ 3 GW. Si on construisait une capacité *double* de cette puissance, permettant aux incinérateurs de fournir jusqu'à 6 GW, et donc en supposant que l'on prévoie qu'ils ne fonctionnent que la moitié du temps, ils seraient capables de fournir 6 GW durant les périodes de forte demande, puis zéro pendant les heures creuses. Ces centrales seraient conçues pour être démarrées ou éteintes en moins d'une heure, ce qui permettrait de gérer des taux de variations de 6 GW par heure — mais seulement pour une variation, à la hausse ou à la baisse, de 6 GW au maximum ! Voilà qui constitue une contribution intéressante, mais la variation maximum qu'elle offre n'est pas suffisante si on veut pouvoir faire face à des fluctuations de vent de 33 GW.

Et l'hydroélectricité ? Les centrales hydroélectriques de Grande-Bretagne ont un facteur de charge moyen de 20 % ; elles ont sûrement la capacité d'être démarrées et arrêtées à la demande. En fait, non seulement l'hydroélectrique le permet, mais en pratique, il le permet sur des intervalles de temps très courts. Par exemple, Glendoe, une nouvelle centrale hydroélectrique avec une capacité de 100 MW, pourra être lancée à pleine puissance à partir de zéro en seulement 30 secondes. Cela fait un taux de variation de 12 GW par heure pour une seule centrale ! Un parc hydroélectrique suffisamment large pourrait donc faire face aux variations introduites par d'énormes fermes éoliennes. Cependant, la capacité du parc hydroélectrique britannique n'est *pas* assez grand aujourd'hui pour apporter une contribution significative à notre problème de variations courtes (en supposant que nous voulions pouvoir faire face à la perte rapide de, disons, 10 ou 33 GW de puissance éolienne). La capacité totale des centrales hydroélectriques traditionnelles en Grande-Bretagne est seulement d'environ 1,5 GW.

Donc se contenter d'allumer et d'éteindre d'autres sources d'énergie renouvelable ne pourra pas fonctionner en Grande-Bretagne. Il nous faut d'autres solutions.

Stocker par pompage

Les systèmes de stockage par pompage utilisent de l'électricité pas chère pour pousser de l'eau d'un lac en aval jusqu'à un lac en amont ; puis pour régénérer de l'électricité lorsque celle-ci est précieuse, en utilisant les mêmes turbines que dans les centrales hydroélectriques classiques.

La Grande-Bretagne possède quatre installations de stockage par pompage, qui peuvent stocker jusqu'à 30 GWh à elles quatre (tableau 26.4,

centrale	puissance (GW)	hauteur de chute (m)	volume (millions de m ³)	énergie stockée (GWh)
Ffestiniog	0,36	320–295	1,7	1,3
Cruachan	0,40	365–334	11,3	10
Foyers	0,30	178–172	13,6	6,3
Dinorwig	1,80	542–494	6,7	9,1

TABEAU 26.4. Installations de stockage par pompage en Grande-Bretagne. La quantité maximum d'énergie que l'on peut stocker dans les systèmes actuels de stockage par pompage est d'environ 30 GWh.

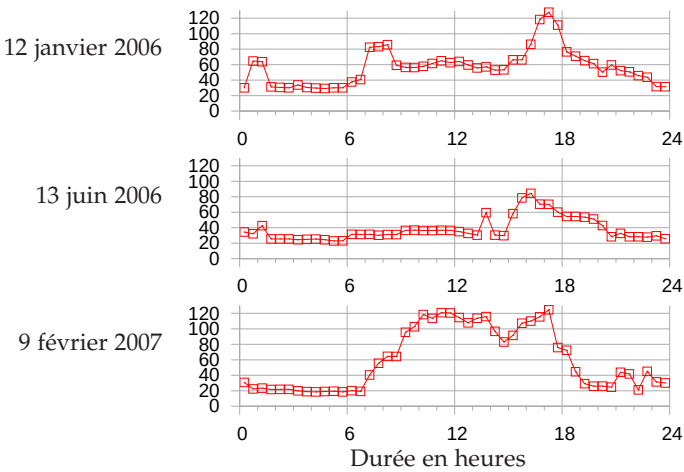


FIGURE 26.5. Comment le stockage par pompage est rentabilisé. Prix de l'électricité, en livres sterling par MWh, durant trois jours de 2006 et 2007.

figure 26.6). On les utilise typiquement pour stocker l'électricité en excès durant la nuit, pour la restituer ensuite durant la journée, en particulier au moment des pics de demande — une activité économiquement très profitable, comme le montre la figure 26.5. La centrale de Dinorwig — une cathédrale stupéfiante, logée à l'intérieur d'une montagne dans la Snowdonia — joue aussi le rôle d'une assurance : elle a assez de punch pour pouvoir relancer le réseau électrique entier en cas de coupure majeure. Dinorwig peut être démarrée et passer de 0 à 1,3 GW de puissance en 12 secondes.

Dinorwig est la Reine de ces quatre installations. Regardons rapidement ses caractéristiques vitales. L'énergie totale qu'elle peut stocker est d'environ 9 GWh. Son lac amont est environ 500 mètres au dessus de son lac aval, et son volume de fonctionnement, de 7 millions de m³, peut s'écouler avec un débit maximum de 390 m³/s, ce qui permet de maintenir une puissance fournie de 1,7 GW pendant 5 heures. Le rendement de ce système de stockage est de 75 %.

Si les quatre centrales de stockage par pompage sont allumées en même temps, elles peuvent produire une puissance de 2,8 GW. On peut les démarrer très vite, ce qui permet de faire face à n'importe quelle variation courte, qu'il s'agisse de fluctuations de la demande ou du vent. Cependant, cette capacité de 2,8 GW ne suffit pas à remplacer 10 GW ou 33 GW



FIGURE 26.6. Llyn Stwlan, le réservoir amont de l'installation de stockage par pompage de Ffestiniog, au nord du Pays de Galles. Énergie stockée : 1,3 GWh. Photo de Adrian Pingstone.

d'éolien qui disparaîtraient brutalement. Et la quantité d'énergie stockée (30 GWh) est très loin d'approcher les 1 200 GWh que nous aurions besoin de pouvoir stocker pour pouvoir faire face à une période de calme un peu longue. Est-ce qu'on pourrait faire monter en puissance le stockage par pompage ? Peut-on imaginer de résoudre l'intégralité du problème des périodes de calme avec juste du stockage par pompage ?

Stocker 1 200 GWh, c'est possible ?

Ce que nous voulons, c'est fabriquer des systèmes de stockage d'énergie beaucoup plus gros, capables de stocker 1 200 GWh (à peu près 130 fois ce que Dinorwig peut stocker). Et on aimerait bien que sa capacité soit d'environ 20 GW — environ 10 fois celle de Dinorwig. Voici donc la solution de stockage par pompage : il nous faut imaginer créer en gros 12 nouveaux sites, chacun capable de stocker 100 GWh — à peu près dix fois la quantité d'énergie que peut stocker Dinorwig. Les machines de pompage et de génération de chaque site seraient les mêmes que celles de Dinorwig.

En supposant que les générateurs ont un rendement de 90 %, le tableau 26.7 montre différentes possibilités pour stocker 100 GWh, avec toute une série de hauteurs de chute. (La physique qui se cache derrière les chiffres de ce tableau est détaillée dans les notes de fin de ce chapitre.)

Quelques manières de stocker 100 GWh		
hauteur de chute entre les 2 lacs	volume d'eau requis (millions de m ³)	exemple de taille de lac superficie × profondeur
500 m	80	2 km ² × 40 m
500 m	80	4 km ² × 20 m
200 m	200	5 km ² × 40 m
200 m	200	10 km ² × 20 m
100 m	400	10 km ² × 40 m
100 m	400	20 km ² × 20 m

Est-il possible de trouver douze sites comme ceux-là ? Certes, on pourrait construire plusieurs sites comparables à Dinorwig juste dans Snowdonia. Le tableau 26.8 montre deux sites alternatifs près de Ffestiniog où l'on aurait pu construire deux installations comparables à Dinorwig. Ces sites étaient envisagés dans les années 1970 en concurrence avec Dinorwig, et c'est Dinorwig qui a été choisi.

Des installations de stockage par pompage capables de conserver une quantité d'énergie significativement plus importante que Dinorwig pourraient être construites en Écosse, en menant des travaux sur des installations hydroélectriques existantes. En parcourant une carte d'Écosse, on trouve un site candidat qui pourrait utiliser le Loch Sloy comme lac amont et le Loch Lomond comme lac aval. Ces deux lacs sont déjà reliés par une

TABLEAU 26.7. Stockage par pompage. Quelques manières de stocker 100 GWh. A titre de comparaison (colonne 2), le volume de fonctionnement de Dinorwig est de 7 millions de m³, et le volume du Lake Windermere est de 300 millions de m³. A titre de seconde comparaison (colonne 3), le lac artificiel de Rutland Waters a une superficie de 12,6 km², celui de Grafham Waters une superficie de 7,4 km², et le réservoir de la vallée de Carron, en Écosse, une superficie de 3,9 km². Le plus grand lac de Grande-Bretagne est le Loch Lomond, avec une superficie de 71 km².

site proposé	puissance (GW)	hauteur de chute (m)	volume (millions de m ³)	énergie stockée (GWh)
Bowydd	2,40	250	17,7	12,0
Croesor	1,35	310	8,0	6,7

petite centrale hydroélectrique. La figure 26.9 montre ces lacs, ainsi que les lacs de Dinorwig à la même échelle. La différence d'altitude entre le Loch Sloy et le Loch Lomond est d'environ 270 mètres. La superficie du Loch Sloy est d'environ 1,5 km², et il peut déjà stocker une quantité d'énergie de 20 GWh. Si le barrage du Loch Sloy était relevé de 40 mètres, la quantité d'énergie supplémentaire que l'on pourrait y stocker serait d'environ 40 GWh. Le niveau de l'eau du Loch Lomond changerait au maximum de 80 centimètres durant un cycle. C'est moins que la hauteur des variations annuelles naturelles du niveau d'eau du Loch Lomond (2 mètres).

La figure 26.10 montre 13 sites en Écosse qui disposent d'un potentiel de stockage par pompage. (La plupart d'entre eux disposent déjà d'installations hydroélectriques.) Si dix d'entre eux avaient le même potentiel que celui que j'ai estimé pour le Loch Sloy, alors on pourrait stocker 400 GWh — soit un tiers du total de 1 200 GWh qui était notre objectif.

On pourrait sillonner la carte de Grande-Bretagne pour trouver d'autres sites possibles. Les meilleurs sites seraient proches de grandes fermes éoliennes. Une idée intéressante serait de construire un nouveau lac artificiel dans une vallée suspendue surplombant la mer (avec un barrage qui serait construit en travers de l'entrée), et d'utiliser la mer comme réservoir aval.

En réfléchissant un peu plus loin, on pourrait même imaginer partir d'un lac naturel ou artificiel et placer la moitié de l'installation dans une cavité souterraine. Certains ont déjà émis l'idée d'une cavité utilisant le pompage et placée un kilomètre sous Londres.

En construisant plus de systèmes de stockage par pompage, il semble que nous puissions faire passer notre réserve d'énergie maximum de 30 à 100 GWh, ou peut-être même 400 GWh. Mais atteindre les 1 200 GWh tant espérés paraît vraiment difficile. Heureusement, il existe une autre solution.

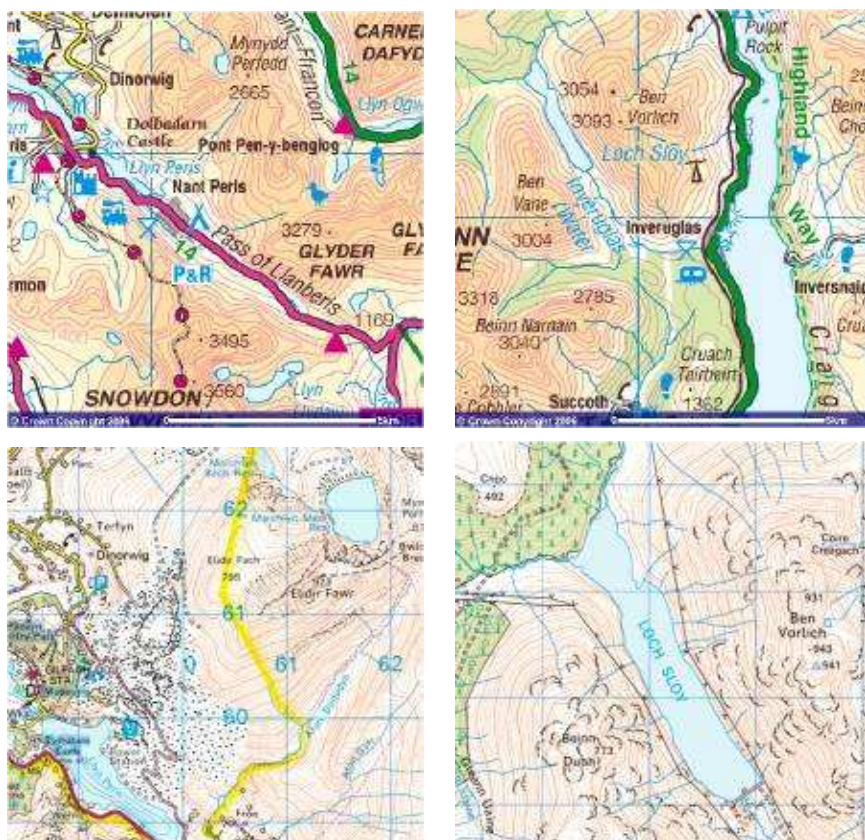
Gestion de la demande en utilisant des véhicules électriques

Résumons-nous : il nous faut être capable de stocker ou de se passer d'environ 1 200 GWh, ce qui fait 20 kWh par personne ; il nous faut aussi être capable de faire face à des fluctuations de fourniture pouvant aller jusqu'à 33 GW — ce qui fait 0,5 kW par personne. Ces chiffres sont délicieusement ressemblants, dans leur échelle, aux besoins d'énergie et de puissance des voitures électriques. Les voitures électriques que nous avons vues au chapitre 20 disposaient de réserves d'énergie comprises entre 9 et

TABLEAU 26.8. Sites alternatifs pour des installations de stockage par pompage dans Snowdonia. Sur ces deux sites, le lac aval devrait être un nouveau lac artificiel.



FIGURE 26.11. Centrale de pompage d'Okinawa, dont le réservoir aval est l'océan. Quantité d'énergie stockée : 0,2 GWh. Photo gracieusement fournie par J-Power. www.ieahydro.org.



Dinorwig héberge un système de stockage de 9 GWh, qui utilise le Marchlyn Mawr (61,5 E, 62,0 N) et le Llyn Peris (59,0 E, 59,8 N) comme réservoirs amont et aval.

Loch Sloy illustre le type d'endroit où un système de stockage de 40 GWh pourrait être créé.

FIGURE 26.9. Dinorwig, dans le parc national de Snowdonia, comparé au Loch Sloy et au Loch Lomond. Les cartes du haut montrent des zones de 10 km par 10 km. Dans les cartes du bas, la grille bleue est constituée de carrés de 1 km de côté. Les images sont fournies par le service *Get-a-map* de l'Ordnance Survey britannique www.ordnancesurvey.co.uk/getamap. Images reproduites avec permission de l'Ordnance Survey. © Copyright de la couronne britannique 2006.



53 kWh. Une flotte nationale de 30 millions de voitures électriques stockerait donc une énergie de l'ordre de 20 kWh par personne ! Les chargeurs de batteries typiques ont une puissance de 2 ou 3 kW. Donc allumer simultanément 30 millions de chargeurs de batterie provoquerait un accroissement de la demande d'environ 60 GW ! La puissance moyenne nécessaire pour alimenter tout le transport du pays, s'il était électrique, est en gros de 40 à 50 GW. L'adoption des voitures électriques, proposée dans le chapitre 20, et la création d'à peu près 33 GW de capacité éolienne, qui fournirait 10 GW de puissance en moyenne, sont donc deux propositions qui s'accordent vraiment bien.

Cet accord pourrait être exploité de la manière suivante : sitôt garées, à la maison ou au travail, les voitures électriques pourraient être branchées à des chargeurs intelligents. Ces chargeurs intelligents connaîtraient à la fois la valeur de l'électricité (très demandée ou peu demandée), et les besoins

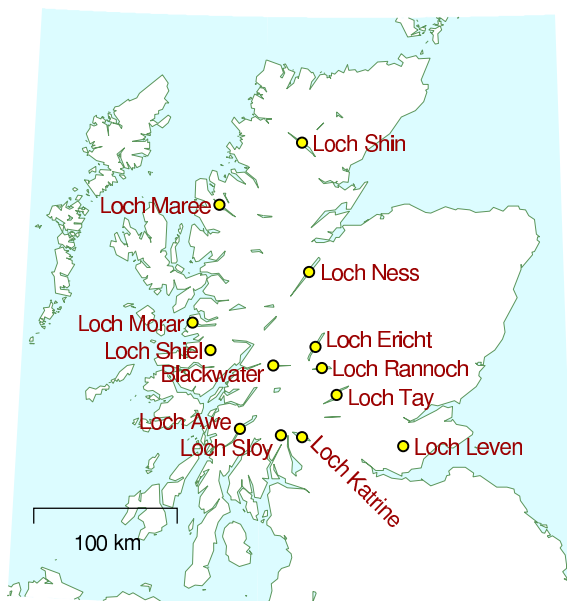


FIGURE 26.10. Lochs en Écosse disposant d'un potentiel de stockage par pompage.

de l'utilisateur de la voiture (par exemple, « ma voiture doit être à pleine charge à 7 heures du matin lundi matin »). Le chargeur satisferait sagement les exigences de l'utilisateur en pompant de l'électricité lorsque le vent souffle, et s'arrêterait lorsque le vent tombe, ou lorsque d'autres types de demande apparaîtraient. Ces chargeurs intelligents fourniraient alors un service utile d'équilibrage du réseau, un service qui pourrait être rétribué financièrement.

La solution serait particulièrement robuste si les batteries des voitures étaient échangeables. Imaginez-vous passer dans une station de recharge et insérer une série de batteries fraîchement chargées en échange de vos batteries vidées. La station de remplissage aurait la responsabilité de recharger les batteries ; elle pourrait le faire aux meilleurs moments, démarquant et éteignant ses chargeurs de sorte que la fourniture totale et la demande totale se retrouvent toujours équilibrées. L'utilisation de batteries échangeables est une solution particulièrement robuste parce qu'il y aurait des millions de batteries de rechange dans les réserves des stations de recharge. Ces batteries de rechange fourniraient un tampon supplémentaire pour nous aider à faire face aux périodes de calme. Certains vont dire : « Mais quelle horreur ! Comment vais-je pouvoir faire confiance à une station de recharge pour prendre soin de mes batteries pour moi ? Et s'ils me donnent une batterie complètement nulle ? » Eh bien, vous pourriez déjà demander aujourd'hui « et si la pompe à essence me donnait du pétrole mélangé à de l'eau ? » Personnellement, je préfère largement utiliser une voiture révisée par un professionnel plutôt que par un rigolo comme moi !

Résumons les possibilités qui s'offrent à nous. On peut équilibrer la de-

mande qui fluctue et la fourniture qui fluctue en allumant et en éteignant des *générateurs* de puissance (des incinérateurs de déchets et des centrales hydroélectriques, par exemple); en *stockant* de l'énergie quelque part et en la régénérant lorsque cela est nécessaire; ou en éteignant et en allumant une partie de la *demande*.

Parmi toutes ces possibilités, la plus prometteuse en termes d'échelle est celle qui consiste à allumer et à éteindre la demande de puissance des chargeurs de batteries des véhicules électriques. 30 millions de voitures, avec chacune 40 kWh de batteries associées (certaines pouvant être échangeables dans des stations de recharge), cela fait 1 200 GWh. Le compte est bon! Et si la livraison de fret était elle aussi électrifiée, la capacité de stockage totale serait alors encore plus grande.

Il y a donc une belle et élégante correspondance entre éolien et véhicules électriques. Si on fait monter en puissance en même temps les véhicules électriques et l'éolien, avec 3 000 nouveaux véhicules électriques diffusés à chaque fois que 3 MW d'éolien sont installés, et si on s'assure que les systèmes de recharge pour les véhicules sont intelligents, cette synergie pourrait bien résoudre une bonne partie du problème des fluctuations de l'éolien. Si ma prédiction sur l'hydrogène se révèle fausse, et que les véhicules à hydrogène s'avèrent être les véhicules à basse énergie du futur, alors la bonne correspondance entre vent et véhicules électriques dont je viens de parler pourrait bien sûr être remplacée par une correspondance équivalente entre vent et véhicules à hydrogène. Les éoliennes feraient de l'électricité; et dès que de l'électricité serait disponible à profusion, de l'hydrogène serait produit et stocké dans des réservoirs, pour un usage futur dans des véhicules ou d'autres applications comme la fabrication de verre.

D'autres idées de stockage et de gestion de la demande

Il existe quelques autres possibilités de gestion de la demande et de stockage de l'énergie. Voyons rapidement de quoi il s'agit.

L'idée de modifier le rythme de production de biens pour la faire correspondre à la puissance d'une source renouvelable n'est pas quelque chose de nouveau. De nombreuses usines de production d'aluminium sont situées près de centrales hydroélectriques; plus il pleut, plus l'usine produit d'aluminium. Dès que de la puissance est consommée pour produire des biens qui peuvent être stockés, il y a un potentiel d'allumage et d'arrêt de la demande de puissance de manière intelligente. Par exemple, les systèmes à osmose inverse (qui fabriquent de l'eau pure à partir d'eau de mer — cf. page 108) sont des consommateurs majeurs de puissance dans de nombreux pays (même si la Grande-Bretagne n'en fait pas partie). Un autre produit stockable possible, c'est la chaleur. Si, comme je l'ai suggéré dans le chapitre 21, on électrifie le chauffage et le refroidissement des bâtiments, en particulier l'obtention d'air chaud et d'eau chaude sanitaire, alors il y a un grand potentiel de demande de puissance facile à allu-

mer et à éteindre et reliée au réseau électrique. Des bâtiments bien isolés conservent leur chaleur pendant de nombreuses heures ; il y a donc beaucoup de souplesse dans le minutage de leur chauffage. De plus, on pourrait inclure de grands réservoirs thermiques dans les bâtiments, et utiliser des pompes pour récupérer de la chaleur de ces réservoirs ou l'y réinjecter, au moment où il y a de l'électricité en abondance ; puis utiliser une seconde série de pompes à chaleur pour transférer de la chaleur ou du froid de ces réservoirs jusqu'aux endroits où du chauffage ou du refroidissement sont demandés.

Contrôler la demande d'électricité de manière automatique serait facile. Pour ce faire, la manière la plus simple est que les appareils comme les réfrigérateurs et les congélateurs écoutent la fréquence du secteur. Lorsqu'il y a une coupure de courant sur le réseau, la fréquence tombe en dessous de sa valeur standard de 50 hertz ; lorsqu'il y a un excès d'électricité, la fréquence augmente au dessus de 50 hertz. (C'est comme avec une dynamo sur un vélo : lorsque vous allumez la lumière, vous devez pédaler plus fort pour fournir la puissance supplémentaire nécessaire à l'éclairage ; si vous ne le faites pas, alors le vélo ira un peu moins vite.) Il est facile de modifier les réfrigérateurs pour que leur thermostat interne monte ou descende un peu en réponse à la fréquence du secteur, de sorte que, sans jamais mettre en danger la température de votre motte de beurre favori, ils tendent à consommer de la puissance au moment où cela facilite le travail du réseau.

Est-ce qu'une telle gestion de la demande peut fournir un gros morceau du stockage virtuel dont nous aurions besoin ? A quel point les réfrigérateurs du pays sont-ils des aspirateurs de puissance ? En moyenne, un réfrigérateur avec freezer typique consomme environ 18 W. Supposons que le nombre de réfrigérateurs soit d'environ 30 millions. La possibilité d'éteindre tous les réfrigérateurs du pays pendant quelques minutes serait donc équivalente à 0,54 GW de puissance automatiquement ajustable. Ça fait un paquet de puissance électrique — plus de 1 % du total national actuel — et ça fait à peu près autant que les augmentations soudaines de demande qui apparaissent lorsque les gens, tous unis dans un élan de ferveur religieuse (comme regarder la série *EastEnders*), allument en même temps leur bouilloire électrique. Ce genre de « rencontres télévisuelles » induisent typiquement des augmentations de demande de l'ordre de 0,6 à 0,8 GW. Couper automatiquement chaque réfrigérateur couvrirait *quasiment* ces petites bizarreries quotidiennes que sont l'allumage concerté des bouilloires. Ces réfrigérateurs intelligents pourraient aussi aider à faire face aux fluctuations courtes de puissance produites par les éoliennes. Les rencontres télévisuelles associées aux plus grands élans de ferveur (par exemple, regarder l'Angleterre jouer au foot contre la Suède) peuvent produire des augmentations soudaines de demande supérieures à 2 GW. En de telles occasions, demande et fourniture d'électricité sont maintenues à l'équilibre en libérant toute la puissance de Dinorwig.

Pour fournir de la souplesse aux gestionnaires du réseau électrique, qui passent leur temps à démarrer et arrêter les centrales pour faire correspondre la fourniture à la demande, de nombreux utilisateurs industriels d'électricité ont des contrats un peu spéciaux, qui permettent aux gestionnaires de stopper la demande de ces utilisateurs avec un très court préavis. En Afrique du sud (où les coupures d'électricité sont fréquentes), des systèmes de gestion de la demande radio-commandés sont en cours d'installation dans des centaines de milliers de foyers, pour commander à distance les systèmes de climatisation et les chauffe-eau électriques.

La solution danoise

Voici comment le Danemark fait face à l'intermittence de ses éoliennes. Les Danois paient effectivement la possibilité d'utiliser les installations hydroélectriques d'autres pays comme installations de stockage. Presque toute la puissance éolienne du Danemark est exportée vers ses voisins européens, dont certains disposent de puissance hydroélectrique qu'ils peuvent éteindre pour équilibrer les choses. La puissance hydroélectrique stockée est ensuite revendue aux Danois (à un prix plus élevé) durant la période suivante de vent faible et de forte demande. Dans l'ensemble, le vent danois est une contribution énergétique utile, et le système dans son ensemble est considérablement sécurisé grâce à la capacité du système hydroélectrique des pays voisins.

Est-ce que la Grande-Bretagne pourrait adopter la solution danoise ? Il nous faudrait des interconnexions directes à grande capacité vers des pays qui disposent d'une grande capacité hydroélectrique facile à allumer et à éteindre ; ou alors une énorme interconnexion au réseau électrique européen.

La Norvège possède une capacité hydroélectrique de 27,5 GW. La Suède possède en gros 16 GW, et l'Islande 1,8 GW. Une ligne à haute tension en courant continu de 1,2 GW vers la Norvège a été envisagée en 2003, mais elle n'a pas été construite. Une ligne vers les Pays-Bas — l'interconnexion BritNed, avec une capacité de 1 GW — sera construite en 2010. La capacité éolienne du Danemark est de 3,1 GW, et il possède une ligne d'interconnexion de 1 GW qui le relie à la Norvège, une autre de 0,6 GW avec la Suède, et une troisième de 1,2 GW avec l'Allemagne, ce qui fait une capacité d'exportation de 2,8 GW, assez semblable à sa capacité éolienne. Pour pouvoir exporter toute sa puissance éolienne en excès comme le Danemark (en supposant qu'elle dispose d'une capacité éolienne de 33 GW), la Grande-Bretagne aurait besoin de quelque chose comme une connexion de 10 GW avec la Norvège, de 8 GW avec la Suède et de 1 GW avec l'Islande.

Une solution avec deux réseaux

Une approche radicale est de mettre la puissance produite avec du vent et les autres sources intermittentes sur un *second* réseau électrique, séparé, et utilisé pour les systèmes qui n'exigent pas de puissance fiable, comme le chauffage et la recharge de batteries de véhicules électriques. Depuis près de 30 ans (1982), l'île écossaise de Fair Isle (population de 70 habitants, superficie de 5,6 km²) possède *deux* réseaux d'électricité qui distribuent de la puissance à partir de deux éoliennes et, si nécessaire, d'un générateur électrique à moteur Diesel. Le service d'électricité standard est fourni sur l'un des réseaux, et le chauffage électrique est fourni sur un second ensemble de câbles. Le chauffage électrique est principalement fourni par l'excès d'électricité provenant des éoliennes qui, sinon, aurait dû être jeté. Des relais programmables, sensibles à la fréquence du secteur, contrôlent à distance les chauffe-eau individuels et les radiateurs électriques à accumulation dans les bâtiments individuels des insulaires. La fréquence du secteur est utilisée pour informer les systèmes de chauffage du moment où ils peuvent s'allumer. En fait, il y a jusqu'à six canaux de fréquence par foyer, ce qui permet au système de faire comme s'il existait sept réseaux électriques différents. Fair Isle a également testé avec succès un système de stockage d'énergie cinétique (par volant d'inertie) pour stocker l'énergie durant les fluctuations de force du vent sur des périodes de 20 secondes.

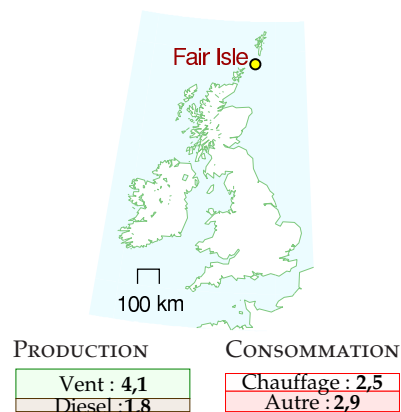


FIGURE 26.12. Production et consommation électrique sur Fair Isle, en 1995–96. Tous les chiffres sont exprimés en kWh/j par personne. La production dépasse la consommation parce que 0,6 kWh/j par personne a dû être jeté.

Des véhicules électriques comme générateurs

Si 30 millions de véhicules électriques acceptaient, en période de pénurie d'électricité au niveau national, de faire fonctionner leurs chargeurs à l'envers et de réinjecter de la puissance dans le réseau, alors, avec 2 kW par véhicule, on aurait une source de puissance potentielle de 60 GW — du même ordre que la capacité de toutes les centrales électriques du pays. Même si seulement un tiers des véhicules était relié au réseau électrique et disponible à un instant donné, cela ferait malgré tout une source potentielle de 20 GW de puissance. Si chacun de ces véhicules faisait une donation d'urgence de 2 kWh d'énergie — correspondant à peut-être 20 % de la capacité de stockage de ses batteries — alors la quantité totale d'énergie fournie par un tel parc serait de 20 GWh — deux fois plus que la quantité d'énergie stockée dans l'installation de stockage par pompage de Dinorwig.

Autres technologies de stockage

Il y a des tas d'autres manières de stocker de l'énergie, et des tas de critères sur lesquels juger de la qualité d'une solution de stockage. La figure 26.13 montre trois des critères les plus importants : densité énergétique (combien d'énergie peut-on stocker par kilogramme de système de stockage); rendement (combien d'énergie arrive-t-on à récupérer par

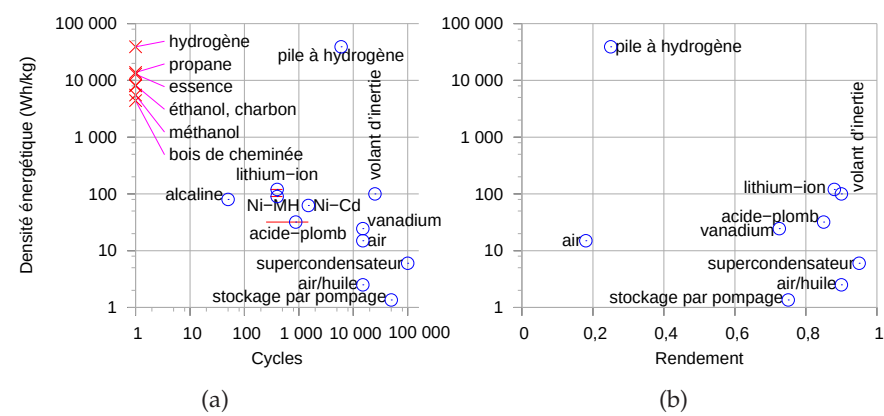


FIGURE 26.13. Caractéristiques de systèmes de stockage et de combustibles. (a) Densité énergétique (échelle logarithmique) vs. durée de vie (nombre de cycles). (b) Densité énergétique vs. rendement. Les densités énergétiques ne prennent pas en compte la masse du conteneur des systèmes énergétiques, sauf pour « l'air » (stockage par air comprimé). Si on prend en compte la masse du réservoir cryogénique qui le conserve, la densité énergétique de l'hydrogène tombe de 39 000 Wh/kg à environ 2 400 Wh/kg.

combustible	valeur calorifique	
	(kWh/kg)	(MJ/L)
propane	13,8	25,4
essence	13,0	34,7
gazole/diesel	12,7	37,9
kérosène	12,8	37
fioul	12,8	37,3
éthanol	8,2	23,4
méthanol	5,5	18,0
bioéthanol		21,6
charbon	8,0	
bois de feu	4,4	
hydrogène	39,0	
gaz naturel	14,85	0,04

(a)

TABEAU 26.14. (a) Valeurs calorifiques (densités énergétiques par kg et par litre) de quelques carburants (en kWh par kg et en MJ par litre). (b) Densité énergétique de quelques batteries (en Wh par kg). 1 kWh = 1 000 Wh.

type de batterie	densité énerg. (Wh/kg)	durée vie (cycles)
nickel-cadmium	45–80	1 500
NiMH	60–120	300–500
acide-plomb	30–50	200–300
lithium-ion	110–160	300–500
lithium-polymère	100–130	300–500
alkaline rechargeable	80	50

(b)

unité d'énergie qu'on y a placée); et durée de vie (combien de cycles de stockage-restitution d'énergie peut-on effectuer avant que le système doive être remis à neuf). Il y a aussi d'autres critères importants : le rythme maximum auquel de l'énergie peut être pompée vers ou depuis le système de stockage, que l'on exprime souvent sous la forme d'une puissance par kilogramme ; la durée pendant laquelle l'énergie reste stockée dans le système ; et, bien sûr, le coût et la sûreté du système.

Volants d'inertie

La figure 26.15 montre un volant d'inertie d'une taille monstrueuse, utilisé pour fournir de brèves poussées de puissance pouvant atteindre 0,4 GW, pour alimenter une installation expérimentale. Il pèse 800 tonnes. Tournant sur lui-même à la vitesse de 225 tours par minute, il peut stocker jusqu'à 1 000 kWh, et sa densité énergétique est d'environ 1 Wh par kg.



FIGURE 26.15. Un des deux volants d'inertie au centre de recherche sur la fusion de Culham, en construction. Photo : EFDA-JET. www.jet.efda.org.

Un système de volant d'inertie conçu pour le stockage d'énergie d'une voiture de course peut stocker jusqu'à 400 kJ (0,1 kWh) d'énergie, et pèse 24 kg (page 149). Cela fait une densité énergétique de 4,6 Wh par kg.

Des volants d'inertie à haute vitesse, faits en matériaux composites, ont des densités énergétiques pouvant aller jusqu'à 100 Wh/kg.

Supercondensateurs

On utilise les supercondensateurs pour stocker de petites quantités d'énergie électrique (jusqu'à 1 kWh) lorsqu'on a besoin de faire de nombreux cycles de charge/décharge et que le temps de charge doit être court. Par exemple, les supercondensateurs sont préférés aux batteries dans le cas de la récupération d'énergie au freinage par les véhicules qui font de nombreux arrêts et redémarrages. On trouve, sur le marché, des supercondensateurs avec une densité énergétique de 6 Wh/kg.

Une société américaine, EESor, affirme pouvoir faire de bien meilleurs supercondensateurs, qui atteignent une densité énergétique de 280 Wh/kg en utilisant du titanate de baryum.

Batteries redox au vanadium

Des systèmes de batteries redox au vanadium ont fourni un système de stockage d'énergie de 12 MWh pour la ferme éolienne de Sorne Hill en Irlande, dont la capacité actuelle est de « 32 MW », qui devrait augmenter jusqu'à « 39 MW ». Ce système de stockage est une grosse « batterie à flux », c'est-à-dire une pile à combustible à régénération redox, avec plusieurs réservoirs remplis de vanadium dans différents états chimiques. Ce système de stockage peut lisser la production d'une ferme éolienne sur une échelle de quelques minutes, mais la durée la plus longue durant laquelle il peut restituer un tiers de sa capacité (durant une courte période de vent faible) est d'une heure.

Un système de 1,5 MWh au vanadium, coûtant 480 000 dollars US, occupe 70 m² et pèse 107 tonnes. La batterie redox au vanadium a une durée de vie supérieure à 10 000 cycles. Elle peut être chargée et déchargée au même rythme (contrairement aux batteries acide-plomb dont la charge doit être cinq fois plus lente). Son rendement est de 70 à 75 %, aller-retour. Le volume nécessaire pour stocker 20 kWh est d'environ 1 m³ de vanadium 2-molaire dans un bain d'acide sulfurique (ce qui fait 20 Wh/kg).

Pour stocker 10 GWh, il faudrait donc 500 000 m³ (170 bassins de piscine) — par exemple, avec des réservoirs de 2 mètres de haut recouvrant une surface au sol de 500 mètres sur 500 mètres.

Utiliser la technologie vanadium à l'échelle nécessaire pour fabriquer un gros système de stockage par pompage — 10 GWh — pourrait avoir un effet notable sur le marché mondial du vanadium, mais aucune pénurie de vanadium à long terme n'est envisagée. La production mondiale de vanadium à l'heure actuelle est de 40 000 tonnes par an. Un système de

10 GWh contiendrait 36 000 tonnes de vanadium — environ un an de production actuelle. Le vanadium est actuellement obtenu comme un sous-produit d'autres processus, et la ressource totale de vanadium à l'échelle mondiale est estimée à 63 millions de tonnes.

Solutions « économiques »

Dans le monde actuel qui n'associe aucun coût à la pollution au carbone, le seuil de rentabilité financière d'un système de stockage est si élevé qu'il existe une alternative moins chère totalement idiote : le stockage peut être simulé en ajoutant simplement une centrale à gaz de plus pour répondre à la demande supplémentaire, et en perdant la puissance électrique en trop en l'envoyant dans des radiateurs.

Fluctuations saisonnières

Les fluctuations de fourniture et de demande les plus lentes se déroulent à l'échelle d'une saison entière. La fluctuation la plus importante est celle du chauffage des bâtiments, qui augmente durant chaque hiver. La demande actuelle de gaz naturel au Royaume-Uni varie tout au long de l'année, d'une moyenne typique de 36 kWh/j par personne en juillet et en août, à une moyenne de 72 kWh/j par personne de décembre à février, avec des extrêmes allant de 30 à 80 kWh/j/pers. (figure 26.16).

Certains renouvelables ont également des fluctuations annuelles — en été, la puissance solaire est plus intense et la puissance du vent plus faible.

Comment s'accommoder de ces fluctuations à très large échelle ? Les véhicules électriques et le stockage par pompage ne vont pas être d'une grande aide pour stocker des quantités d'énergie de ce genre. Parmi les technologies utiles, il y aura sûrement le stockage thermique à long terme. Un gros bloc de roche ou une grosse cuve d'eau peuvent stocker tout un hiver de chaleur pour un bâtiment — le chapitre E décrit cette idée dans de plus amples détails. Aux Pays-Bas, la chaleur de l'été accumulée par les routes est stockée dans des aquifères jusqu'à l'hiver, puis restituée aux bâtiments via des pompes à chaleur [2wmuw7].

Notes et bibliographie

page n°

222 *La production totale du parc éolien en république d'Irlande*. Les données proviennent de eirgrid.com [2hxf6c].

221 « la disparition du vent impose un plan d'urgence sur le réseau électrique du Texas ». [2199ht] En fait, ma lecture de cet article d'actualité est que cet événement, bien que peu courant, est un exemple de fonctionnement *normal* d'un réseau électrique. Sur le réseau, il y a des consommateurs industriels dont on peut

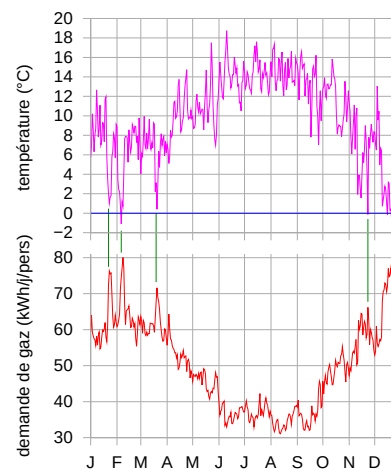


FIGURE 26.16. Demande de gaz (graphique du bas) et température (graphique du haut) en Grande-Bretagne tout au long de 2007.

interrompre l'alimentation, en cas de trop grosse différence entre la fourniture et la demande. La production éolienne a baissé d'un coup de 1,4 GW au moment précis où la demande des Texans augmentait de 4,4 GW, provoquant justement ce genre de différence entre fourniture et demande. Les clients dont on pouvait interrompre l'alimentation ont vu leur alimentation coupée. Tout a fonctionné comme prévu.

Voici un autre exemple, où une meilleure planification du système de génération de puissance aurait été d'un grand secours : « La puissance éolienne d'Espagne établit un nouveau record, des interruptions de production ont été décidées. » [3x2kvv] La consommation d'électricité moyenne en Espagne est de 31 GW. Le mardi 4 mars 2008, ses génératrices éoliennes fournissaient 10 GW. « Le marché de l'électricité espagnol est devenu particulièrement sensible aux fluctuations du vent. »

222 *Les tenants de l'éolien minimisent ce problème : « Ne vous inquiétez pas — les fermes éoliennes prises individuellement sont peut-être intermittentes, mais elles ne sont pas toutes situées au même endroit, donc prises toutes ensemble, elles sont beaucoup moins intermittentes. »* Pour un exemple, consulter le site Web yes2wind.com qui, sur sa page « debunking the myth that wind power isn't reliable » [Démystifier l'affirmation selon laquelle le vent n'est pas fiable] affirme que « the variation in output from wind farms distributed around the country is scarcely noticeable » [les variations de production des fermes éoliennes réparties sur l'ensemble du pays sont à peine visibles.] www.yes2wind.com/intermittency_debunk.html

– [...] le vent est **vraiment** intermittent, même si on couvre d'éoliennes le pays tout entier. Le Royaume-Uni est un peu plus grand que l'Irlande, mais on y retrouve le même problème. Source : Oswald et al. (2008).

226 *Le rendement du pompage de Dinorwig est de 75 %.* La figure 26.17 montre les données correspondantes.

Pour plus d'informations sur Dinorwig et les sites alternatifs de pompage : Baines et al. (1983), Baines et al. (1986).

227 *Tableau 26.7.* Le volume de fonctionnement requis, V , est calculé à partir de la hauteur de chute, h , comme suit. Si ϵ est le rendement de la conversion de l'énergie potentielle en électricité,

$$V = 100 \text{ GWh} / (\rho g h \epsilon),$$

où ρ est la densité de l'eau et g est l'accélération de la gravité. J'ai fait l'hypothèse que les générateurs avaient un rendement de $\epsilon = 0,9$.

228 *Tableau 26.8, Sites alternatifs pour des installations de stockage par pompage.* Le réservoir amont proposé pour Bowydd était Llyn Newydd, référence de grille SH 722 470 ; pour Croesor : Llyn Cwm-y-Foel, SH 653 466.

– Si dix installations de stockage par pompage en Écosse avaient le même potentiel que celui que j'ai estimé pour le Loch Sloy, alors on pourrait stocker 400 GWh. Cette estimation grossière est confirmée par une étude de la Strathclyde University [5o2xgu] qui liste 14 sites totalisant une capacité de stockage estimée à 514 GWh.

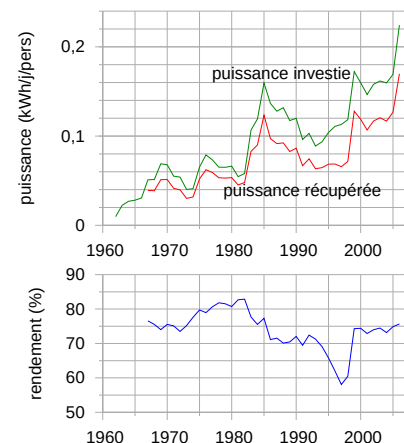


FIGURE 26.17. Rendement des quatre systèmes de stockage par pompage de Grande-Bretagne.



FIGURE 26.18. Un site possible pour une autre installation de stockage par pompage de 7 GWh. La vallée de Croesor se trouve au centre gauche de la carte, entre le pic acéré à gauche (Cnicht) et les montagnes plus étalées à droite (les Moelwyns).

- 232 *Il est facile de modifier les réfrigérateurs pour que leur thermostat interne monte ou descende un peu en réponse à la fréquence du secteur.* [2n3pmb] Plus de liens sur : Dynamic Demand www.dynamicdemand.co.uk ; www.rlttec.com ; www.responsiveload.com.
- 233 *En Afrique du sud [...] des systèmes de gestion de la demande sont en cours d'installation.* Source : [2k8h4o]
- *Presque toute la puissance éolienne du Danemark est exportée vers ses voisins européens.* Source : Sharman (2005).
- 234 *Depuis plus de 25 ans (depuis 1982), l'île écossaise de Fair Isle possède deux réseaux d'électricité.*
www.fairisle.org.uk/FIECo/
 L'essentiel du temps, les vitesses de vent sont comprises entre 3 m/s et 16 m/s ; 7 m/s est la vitesse la plus probable.
- 235 *Figure 26.13. Rendements de stockage.* Batteries lithium-ion : rendement de 88 %.
 Source : www.national.com/appinfo/power/files/swcap_eet.pdf
 Batteries acide-plomb : 85–95 %.
 Source : www.windsun.com/Batteries/Battery_FAQ.htm
 Stockage par air comprimé : rendement de 18 %. Source : Lemofouet-Gatsi et Rufer (2005), Lemofouet-Gatsi (2006). Voir aussi Denholm et al. (2005).
- Air/huile : les accumulateurs hydrauliques, que l'on utilise comme pour récupérer l'énergie au freinage sur les camions, sont des dispositifs de stockage à air comprimé qui peuvent atteindre un rendement de 90 % aller-retour, permettant de capturer 70 % de l'énergie cinétique. Sources : Lemofouet-Gatsi (2006), [5cp27j].
- *Tableau 26.14.* Sources : Xtronics xtronics.com/reference/energy_density.htm ; Battery University [2sx1yj] ; information sur les volants d'inertie provenant de Ruddell (2003).
 Les dernières batteries avec les densités énergétiques les plus élevées sont des batteries au lithium-sulfure et au lithium-sulfite, qui atteignent 300 Wh/kg.
 Certains fervents de l'hydrogène, devenus désabusés, semblent s'être rabattus sur la table périodique des éléments et être devenus fervents du bore. Le bore (en supposant que vous en brûliez pour obtenir du trioxyde de bore B₂O₃) possède une densité énergétique de 15 000 Wh/kg, ce qui n'est franchement pas mal. Mais j'imagine que mon principal sujet d'inquiétude s'appliquerait aussi au bore : en l'occurrence, le fait que la régénération du combustible (ici, le bore à partir d'oxyde de bore) sera inefficace du point de vue énergétique, et donc, par voie de conséquence, le processus de combustion le sera aussi.
- 236 *Batteries redox au vanadium.* Sources : www.vrbpower.com ; *fermes éoliennes irlandaises* [ktd7a] ; *vitesse de recharge* [627ced] ; *production mondiale* [5fas17].
- 237 [...] *La chaleur de l'été accumulée par les routes est stockée dans des aquifères [...]* [2wmuw7].

27 Cinq plans énergétiques pour la Grande-Bretagne

Si l'on veut se débarrasser de notre addiction actuelle aux combustibles fossiles, il nous faut un plan avec des actions radicales. Et il faut qu'avec ce plan, le compte soit bon. Ce plan doit aussi s'accompagner d'un agenda politique et financier. Politique et économie ne font pas partie des sujets que ce livre s'est fixés. Je me contenterai donc ici de parler de ce à quoi pourraient ressembler les aspects techniques d'un plan dont le compte est bon.

Nombreux sont les plans dont le compte est bon. Dans ce chapitre, je vais en décrire cinq. Mais je vous en prie, ne prenez pas chacun de ces cinq plans comme « la solution recommandée par l'auteur ». Ma seule et unique recommandation, c'est celle-ci :

Assurez-vous que dans votre politique, il y ait un plan dont le compte soit bon !

Chaque plan a un volet consommation et un volet production : nous devons déterminer combien de puissance notre pays consommera, et combien de puissance il doit produire. Pour éviter que chaque plan prenne des pages et des pages, je vais m'occuper de « la version schématique de notre pays », dans lequel nous ne consommons de la puissance que sous trois formes : le transport, le chauffage et l'électricité. Ce faisant, je fais une énorme simplification, puisque j'oublie l'industrie, l'élevage, la production de nourriture, les importations, etc. Mais j'espère que cette simplification sera utile, et qu'elle nous permettra de comparer et de mettre face à face des plans alternatifs en quelques instants. En fin de compte, il nous faudra des plans plus détaillés, mais pour l'instant, nous sommes tellement loin de notre destination qu'il me semble qu'une vision schématique est la meilleure manière de saisir les problèmes.

Je vais présenter quelques plans que je crois faisables pour le Royaume-Uni en 2050. Tous partageront le même volet consommation. J'insiste encore une fois : cela ne veut pas dire que je crois que ce plan ait un niveau de consommation correct, ou que ce soit le seul plan. Je veux juste éviter de vous noyer avec un long catalogue de plans. Du côté de la production, je vais décrire une série de plans qui combinent différents renouvelables, « charbon propre » et nucléaire.

La situation actuelle

La situation actuelle de notre pays schématique est la suivante. Le transport (d'humains aussi bien que de trucs) consomme 40 kWh/j par personne. L'essentiel de cette énergie est actuellement consommé sous forme d'essence, de gazole et de kérosène. Le chauffage de l'air et de l'eau consomme 40 kWh/j par personne. Actuellement, l'essentiel de cette éner-

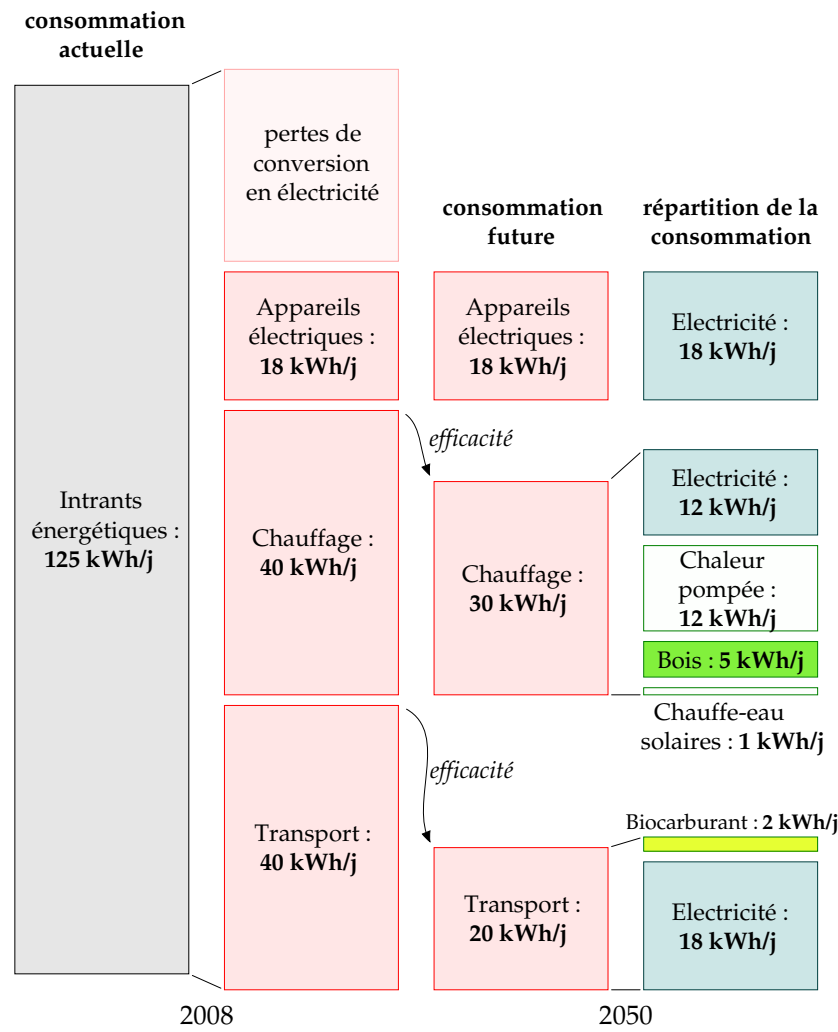


FIGURE 27.1. La consommation actuelle par personne dans la « Grande-Bretagne schématisée de 2008 » (deux colonnes de gauche), et un plan possible de consommation future, accompagné d’une analyse possible de cette consommation carburant par carburant (deux colonnes de droite). Ce plan requiert que la fourniture d’électricité soit augmentée pour passer de 18 à 48 kWh/j par personne.

gie est fourni sous forme de gaz naturel. La quantité d’électricité fournie se monte à 18 kWh/j par personne, et consomme des combustibles divers (pour l’essentiel, du charbon, du gaz et du nucléaire) avec un contenu énergétique de 45 kWh/j par personne. Les 27 kWh/j par personne restants partent dans les tours de refroidissement (25 kWh/j/pers.) ou sont perdus dans les méandres du réseau de distribution (2 kWh/j/pers.). L’énergie totale en entrée dans ce pays schématisé d’aujourd’hui est de 125 kWh/j par personne.

Caractéristiques communes aux cinq plans

Dans mon scénario, la consommation de l’énergie sera réduite en utilisant des technologies plus efficaces pour le transport et le chauffage.

Dans les cinq plans proposés pour l'avenir, le **transport** est largement électrifié. Les moteurs électriques sont beaucoup plus efficaces que les moteurs à essence ou les moteurs Diesel : la quantité d'énergie requise pour le transport est donc réduite. Les transports publics (eux aussi largement électrifiés) sont plus intégrés, plus personnalisés et plus souvent utilisés. J'ai supposé que l'électrification rendait les transports à peu près quatre fois plus efficaces, et que la croissance économique annulait une partie de ces économies d'énergie, de sorte que l'effet net ne fait que diviser par deux la consommation d'énergie totale des transports. Il y a quelques véhicules indispensables qu'on ne pourra pas électrifier facilement ; pour ceux-là, il nous faudra fabriquer nos propres carburants liquides (par exemple du biodiesel, du biométhanol ou du bioéthanol cellulosique). L'énergie nécessaire au transport est de 18 kWh/j/pers. d'électricité et 2 kWh/j/pers. de carburants liquides. Les batteries des véhicules électriques servent de système de stockage d'énergie, pour aider à faire face aux fluctuations de l'offre et de la demande d'électricité. La superficie nécessaire à la production de biocarburants est d'environ 12 % de la superficie du Royaume-Uni (500 m² par personne), en supposant que la production de biocarburants provient de plantes qui ont un rendement de 1 %, et que la conversion des plantes en carburant a un rendement de 33 %. Une autre solution pourrait être d'importer les biocarburants dont nous avons besoin, si nous pouvons persuader d'autres pays de dédier les surfaces nécessaires (avec la taille du Pays de Galles) de terres agricoles pour produire nos biocarburants.

Dans les cinq plans, la consommation d'énergie pour le **chauffage** est réduite en améliorant l'isolation de tous les bâtiments et le contrôle de leur température (par l'utilisation des thermostats, l'éducation et la promotion des pulls et autres vêtements chauds d'intérieur par des personnes sexy). De nouveaux bâtiments (tous ceux construits à partir de 2010) sont vraiment bien isolés et ne requièrent presque plus de chauffage de leur air intérieur. Les anciens bâtiments (qui domineront encore le parc bâti en 2050) sont pour l'essentiel chauffés par des pompes à chaleur air-air ou géothermique. Une partie de l'eau chaude sanitaire est fournie par des panneaux solaires (2,5 m² sur chaque maison), une autre partie par des pompes à chaleur et une autre partie encore par de l'électricité. Quelques bâtiments situés près de forêts gérées et de plantations énergétiques sont chauffés par la biomasse. La puissance requise pour le chauffage est donc réduite, passant de 40 kWh/j/pers. à 12 kWh/j/pers. d'électricité, 1 kWh/j/pers. d'eau chaude solaire et 5 kWh/j/pers. de bois.

Le bois nécessaire à la production de la chaleur (ou, lorsque c'est possible, pour faire de la cogénération) provient des forêts alentour et des récoltes énergétiques (peut-être à partir de miscanthus, de bois de saule ou de peuplier) couvrant une superficie de 30 000 km², soit 500 m² par personne ; cela correspond à 18 % des terres agricoles du Royaume-Uni, qui ont une superficie de 2 800 m² par personne. Les récoltes énergétiques sont principalement cultivées sur les sols de moindre qualité, laissant les

meilleurs sols à l'agriculture de production de nourriture. Chaque récolte énergétique obtenue à partir de 500 m² donne 0,5 tonne de matière sèche végétale, avec un contenu énergétique d'environ 7 kWh/j/pers. ; de cette puissance, environ 30 % est perdue dans le processus de production et de distribution de chaleur. La chaleur finalement fournie est de 5 kWh/j par personne.

Dans ces plans, je suppose que la demande actuelle d'électricité pour les gadgets, l'éclairage,... reste inchangée. Ce sont donc 18 kWh(e)/j/pers. d'électricité qu'il nous faut. Oui, c'est vrai, l'efficacité de l'éclairage est amélioré en utilisant des ampoules à LED pour l'essentiel de l'éclairage, et de très nombreux autres gadgets seront plus efficaces ; mais grâce aux nombreux bienfaits de la croissance économique, nous utiliserons bien plus de gadgets dans nos vies — par exemple des systèmes de vidéo-conférence pour nous aider à moins voyager.

La consommation totale d'électricité avec de tels plans évolue à la hausse (à cause des 18 kWh/j/pers. du transport électrifié et des 12 kWh/j/pers. des pompes à chaleur), atteignant 48 kWh/j/pers. (ou 120 GW, au niveau national). C'est presque un triplement de la consommation d'électricité du Royaume-Uni. D'où cette énergie peut-elle venir ?

Essayons de décrire quelques possibilités. Ces possibilités, alternatives l'une de l'autre, ne sont pas toutes « durables », tel que nous l'avons défini dans ce livre. Mais toutes constituent des plans à faible empreinte carbone.

Produire beaucoup d'électricité : les éléments de base

Pour produire beaucoup d'électricité, chaque plan utilise une certaine quantité d'éolien terrestre et en mer ; du photovoltaïque ; si possible, de la puissance solaire achetée auprès d'autres pays disposant de déserts ; de l'incinération des déchets (y compris des ordures ménagères et des déchets agricoles) ; de l'hydroélectricité (la même quantité qu'aujourd'hui) ; peut-être de la puissance des vagues de houle ; des barrages et des lagons marémoteurs, ainsi que de la puissance de courant de marées ; peut-être du nucléaire ; et peut-être du « combustible fossile propre », c'est-à-dire du charbon brûlé dans des centrales qui capturent et séquestrent le carbone. Chaque plan a pour objectif d'atteindre une production totale d'électricité de 50 kWh/j/pers. en moyenne — j'ai pris ce chiffre en arrondissant les 48 kWh/j/pers. de demande moyenne, ce qui permet de prendre en compte les pertes dans le réseau de distribution électrique.

Certains des plans qui suivent vont importer de la puissance d'autres pays. A titre de comparaison, il peut être utile de savoir combien de puissance électrique nous importons déjà aujourd'hui. La réponse est qu'en 2006, le Royaume-Uni a importé 28 kWh/j/pers. de carburants — 23 % de sa consommation d'énergie primaire. Ces importations sont dominées par le charbon (18 kWh/j/pers.), le pétrole brut (5 kWh/j/pers.) et le gaz naturel (6 kWh/j/pers.). Le combustible nucléaire (uranium) n'est habituelle-

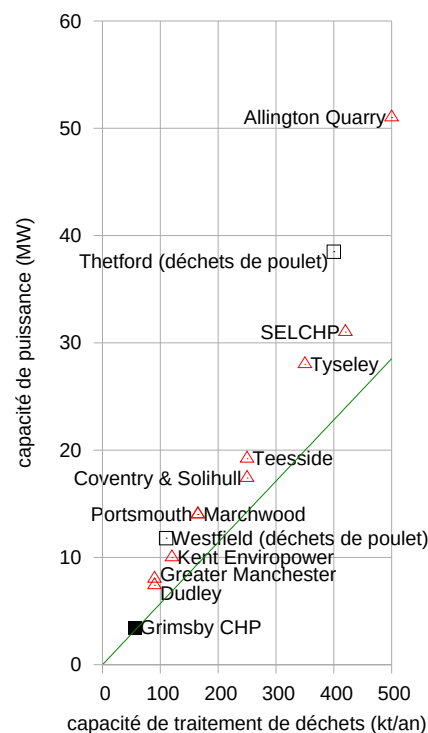


FIGURE 27.2. Installations de production d'énergie à partir de déchets en Grande-Bretagne. La ligne montre la production de puissance moyenne en supposant que 1 kg de déchets permet d'obtenir 0,5 kWh d'électricité.

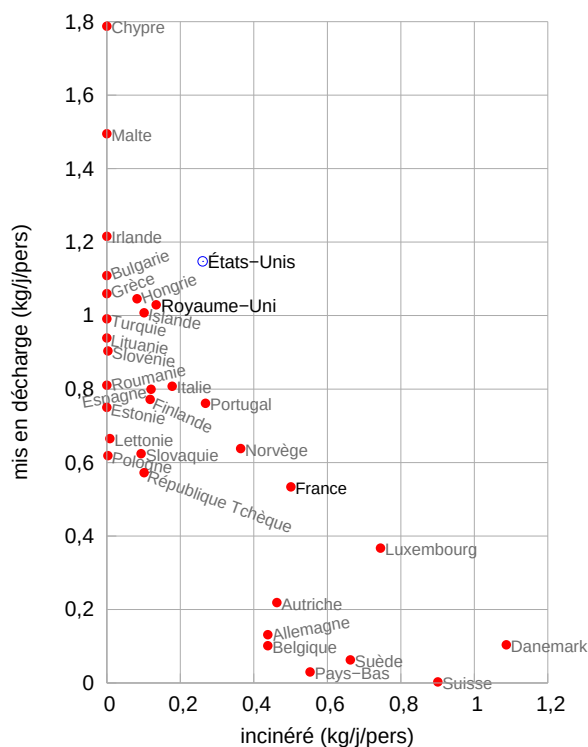
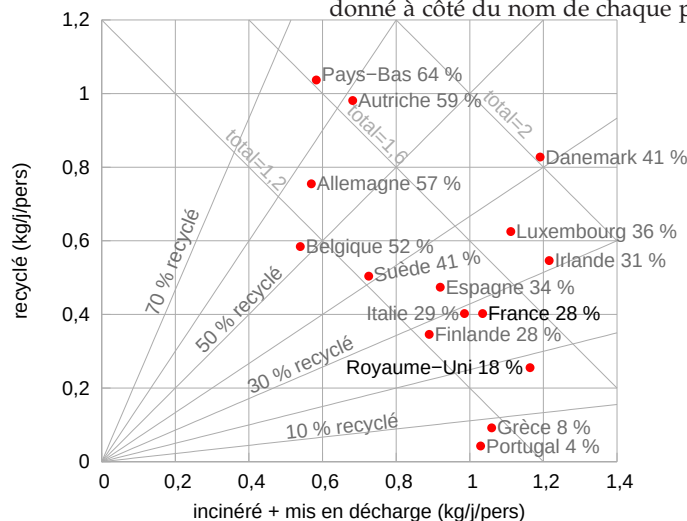


FIGURE 27.3. A gauche : déchets solides municipaux mis en décharge, comparés à la quantité incinérée, en kg par jour et par personne, par pays. A droite : Quantité de déchets recyclés, vs. quantité mise en décharge ou incinérée. Le pourcentage de déchets recyclés est donné à côté du nom de chaque pays.



ment pas compté dans ces importations, car il peut être stocké facilement.

Dans ces cinq plans, je vais supposer que l'on multiplie le volume de déchets incinérés, au point que tous les déchets municipaux qu'on ne peut pas recycler sont incinérés au lieu d'être mis en décharge. Incinérer 1 kg de déchets par jour et par personne permet d'obtenir en gros 0,5 kWh/j par personne d'électricité. Je vais supposer qu'une quantité similaire de déchets agricoles est également incinérée, permettant d'obtenir 0,6 kWh/j par personne d'électricité supplémentaire. Incinérer tous ces déchets requiert en gros une capacité de conversion de déchets en énergie de 3 GW, soit une multiplication par dix du parc d'incinérateurs qui existait en 2008 (figure 27.2). Londres (7 millions d'habitants) disposerait de 12 centrales de conversion de déchets en énergie de 30 MW comme l'usine SELCHP actuelle située dans le sud de Londres (voir page 338). Birmingham (1 million d'habitants) en aurait deux. Chaque ville de 200 000 habitants disposerait d'une centrale de conversion de déchets en énergie de 10 MW. Toutes les craintes sur la difficulté de mise en place à une telle échelle, sur le caractère sale ou sur la dangerosité des incinérateurs devraient être calmées par la figure 27.3, qui montre que de nombreux pays en Europe incinèrent *beaucoup* plus de déchets par personne que le Royaume-Uni ; parmi ces pays « amoureux » de l'incinération, il y a l'Allemagne, la Suède, le Danemark,

les Pays-Bas, la Suisse — pas vraiment le genre de pays que, d’habitude, on associe à des problèmes d’hygiène ! Un effet secondaire positif de ce plan d’incinération des déchets est qu’il élimine les émissions futures de méthane provenant des décharges.

Dans les cinq plans, l’hydroélectricité contribue pour 0,2 kWh/j/pers., c’est-à-dire autant qu’aujourd’hui.

Les véhicules électriques sont utilisés comme une réserve d’ajustement à la volée du réseau électrique. La puissance moyenne nécessaire pour charger les véhicules électriques est de 45 GW (18 kWh/j/pers.). Les fluctuations des sources renouvelables comme le solaire et le vent peuvent être équilibrées en augmentant et en baissant leur charge, aussi longtemps que les fluctuations ne sont pas trop grandes ou qu’elles ne durent trop longtemps. Les variations de demande d’électricité à l’intérieur de la journée seront encore plus prononcées que ce qu’elles peuvent être aujourd’hui, parce qu’on aura remplacé le gaz de la cuisine et du chauffage par de l’électricité (voir la figure 26.16, page 237). Pour s’assurer que l’on puisse répondre à des pics de demande de 10 GW durant jusqu’à 5 heures, tous les plans supposent la construction de cinq nouvelles installations de stockage par pompage comparables à celle de Dinorwig (ou la modification d’installations hydroélectriques existantes pour fournir du stockage par pompage). 50 GWh de stockage correspondent à cinq Dinorwig, chacun avec une capacité de 2 GW. Certains plans ci-dessous exigeront une capacité de pompage encore supérieure. Et pour une sécurité d’approvisionnement supplémentaire, tous les plans supposent la mise en place d’une interconnexion électrique d’une capacité de 2 GW avec la Norvège.

Produire beaucoup d’électricité : le plan D

Le plan D (« D » veut dire « diversité nationale ») utilise toutes les sources possibles nationales d’électricité dans des quantités énormes, et il dépend relativement peu de la fourniture d’énergie venant d’autres pays.

Voici comment le plan D obtient ses 50 kWh/j/pers. d’électricité. Éolien : 8 kWh/j/pers. (soit 20 GW en moyenne, 66 GW en crête) (plus environ 400 GWh d’installations de stockage par pompage associées). Photovoltaïque : 3 kWh/j/pers. Incinération des déchets : 1,1 kWh/j/pers. Hydroélectricité : 0,2 kWh/j/pers. Énergie des vagues : 2 kWh/j/pers. Marémoteur : 3,7 kWh/j/pers. Nucléaire : 16 kWh/j/pers. (40 GW). « Charbon propre » : 16 kWh/j/pers. (soit 40 GW).

Obtenir 8 kWh/j par personne d’éolien requiert une multiplication par 30 du parc installé par rapport à 2008. La Grande-Bretagne aurait alors presque trois fois plus de matériel éolien que ce que l’Allemagne ne possède aujourd’hui. Installer une telle quantité d’éolien offshore sur une période de 10 ans nécessiterait en gros 50 plates-formes auto-élevatrices.

Obtenir 3 kWh/j par personne de photovoltaïque requiert 6 m² de panneaux avec un rendement de 20 % par personne. La plupart des pans de

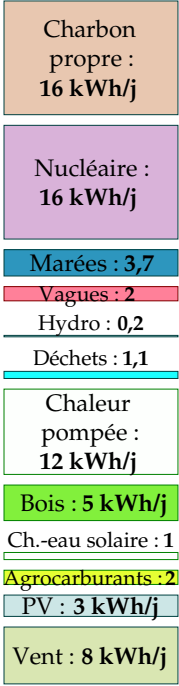


FIGURE 27.4. Plan D.

toit orientés au sud devraient être couverts de panneaux ; une autre solution qui pourrait être plus économique, et qui pourrait aussi limiter la détresse des membres de la Ligue de Protection des Vieux Bâtiments, serait de planter nombre de ces panneaux dans la campagne à la manière traditionnelle bavaroise (figure 6.7, page 48).

L'incinération des déchets correspond à 1 kg par jour et par personne de déchets domestiques (permettant d'obtenir 0,5 kWh/j/pers.) et une quantité similaire de déchets agricoles permettant d'obtenir 0,6 kWh/j/pers. ; l'hydroélectricité fournit 0,2 kWh/j/pers., soit la même quantité que celle que l'on en obtient aujourd'hui.

La puissance des vagues requiert 16 000 dispositifs à vagues en haute mer Pelamis, couvrant 830 km de littoral atlantique (voir la carte page 85).

La puissance marémotrice provient, pour 5 GW d'installations de courant de marée, pour 2 GW du barrage sur la Severn et de 2,5 GW de lagons de marée, qui peuvent également servir de systèmes de stockage par pompage.

Pour obtenir 16 kWh/j/pers. de puissance nucléaire, il faut un parc nucléaire de 40 GW, ce qui correspond en gros à une multiplication par quatre du parc existant en 2007. Si on produisait 16 kWh/j/pers. de puissance nucléaire, on se situerait quelque part entre la Belgique, la Finlande, la France et la Suède en termes de production par habitant : la Belgique et la Finlande produisent chacun, en gros, 12 kWh/j/pers. ; la France et la Suède produisent respectivement 19 kWh/j/pers. et 20 kWh/j/pers.

Pour obtenir 16 kWh/j/pers. de « charbon propre » (40 GW), il faudrait prendre le parc actuel de centrales au charbon, qui fournit environ 30 GW, lui installer des systèmes de capture du carbone, ce qui réduirait sa production à 22 GW, puis construire 18 GW supplémentaires de nouvelles centrales au charbon disposant d'un système de capture du carbone. Ce niveau de puissance au charbon requiert en entrée une quantité d'énergie d'environ 53 kWh/j/pers. de charbon, ce qui est un petit peu plus que le rythme auquel nous brûlons actuellement des combustibles fossiles dans des centrales *tous* combustibles confondus, et largement au dessus du niveau que nous avons estimé comme étant « durable » dans le chapitre 23. Ce rythme de consommation de charbon est en gros trois fois plus important que le rythme actuel d'importation de charbon (18 kWh/j/pers.). Si aucune mine de charbon n'est rouverte, ce plan signifie que 32 % de l'électricité du Royaume-Uni dépendra de charbon importé. Rouvrir les mines de charbon britanniques pourrait fournir une quantité d'énergie entrante d'environ 8 kWh/j/pers., donc quelle que soit la solution choisie, cela ne permettrait pas au Royaume-Uni d'être auto-suffisant en charbon.

Y a-t-il des éléments de ce plan qui vous paraîtraient déraisonnables ou choquants ? Si tel est le cas, peut-être l'un des quatre plans suivants vous conviendra-t-il plus.

Produire beaucoup d’électricité : le plan P

Le plan P, c’est le plan « pas-de-ça-chez-moi », celui des gens qui ne veut pas que l’on industrialise les campagnes de Grande-Bretagne avec des installations de production d’énergie renouvelable, et qui ne veulent pas non plus de centrales nucléaires. Découvrons ce plan par étapes.

Tout d’abord, on tourne à la baisse tous les boutons renouvelables qui étaient poussés à leur maximum dans le plan D, à savoir : éolien, 2 kWh/j/pers. (5 GW en moyenne) ; photovoltaïque, 0 ; vagues, 0 ; marémoteur, 1 kWh/j/pers.

Ce faisant, on vient juste de perdre 14 kWh/j/pers. (35 GW au niveau national). (Mais attention, ne vous méprenez pas ! L’éolien reste multiplié par huit par rapport au niveau qu’il a atteint en 2008.)

Dans le plan « pas-de-ça-chez-moi », on réduit la contribution du nucléaire à 10 kWh/j/pers. (25 GW) — une réduction de 15 GW par rapport au plan D, mais qui reste une augmentation substantielle par rapport aux niveaux actuels. 25 GW de puissance nucléaire pourraient, je pense, être concentrés sur les sites nucléaires actuels, de sorte qu’il n’y ait pas besoin de créer de nouveaux sites et de nouveaux voisins mécontents. J’ai laissé la contribution du charbon propre inchangée, à 16 kWh/j/pers. (40 GW). Les contributions à la production d’électricité de l’hydroélectricité et de l’incinération des déchets restent les mêmes que dans le plan D.

Comment allons-nous obtenir nos 50 GW de plus ? Les « pas-de-ça-chez-moi » disent : « pas de ça chez moi, mais chez les autres, je veux bien. » Le plan « pas-de-ça-chez-moi » paie donc d’autres pays pour qu’ils exportent de la puissance solaire produite dans leurs déserts, à hauteur de 20 kWh/j/pers. (50 GW).

Ce plan impose de créer cinq zones de la taille de Londres (44 kilomètres de diamètre) dans les déserts méditerranéens, couvertes de centrales solaires. Il impose également de créer des lignes électriques capables d’acheminer 50 GW de puissance jusqu’au Royaume-Uni. L’interconnexion électrique haute-tension actuelle avec la France ne permet de fournir que 2 GW de puissance. Ce plan impose donc de multiplier par 25 la capacité de connexion électrique avec le continent. (Ou d’utiliser une solution équivalente de transport de puissance — peut-être des bateaux remplis de méthanol ou de bore faisant la navette depuis les rivages des déserts.)

Se reposant sur une moindre puissance éolienne, le plan P n’a pas besoin de construire, en Grande-Bretagne, les installations de stockage par pompage supplémentaires mentionnées dans le plan D, mais étant donnée sa dépendance vis-à-vis du beau temps, il exige quand même de construire des systèmes de stockage quelque part, capables de stocker de l’énergie pour les périodes où le soleil fluctue. Utiliser des systèmes à sels fondus au niveau même des centrales est une possibilité. Exploiter les systèmes de stockage par pompage des Alpes est une autre possibilité. Convertir l’électricité en un combustible qui peut être stocké, comme le méthanol,

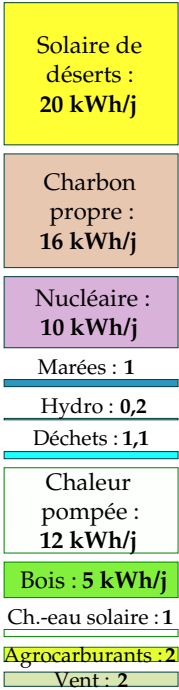


FIGURE 27.5. Plan P.

est également une possibilité, même si les conversions d'énergie entraînent des pertes et donc requièrent la construction de plus de centrales solaires.

Ce plan importe $32 \% + 40 \% = 72 \%$ de l'électricité du Royaume-Uni de pays étrangers.

Produire beaucoup d'électricité : le plan L

Il y a des gens qui disent : « on ne veut pas de nucléaire ! » Comment les satisfaire ? Après tout, c'est peut-être le boulot des antinucléaires de persuader les « pas-de-ça-chez-moi » qu'en fait, ils veulent malgré tout des installations de renouvelables chez eux.

On peut faire un plan sans nucléaire en prenant le plan D, en en gardant tous ces renouvelables qu'il faut installer chez soi, et en rayant d'un trait de plume le nucléaire pour le remplacer par de la puissance en provenance des déserts. Comme dans le plan P, la fourniture de puissance par les déserts requièrent une forte augmentation des systèmes de transmission d'électricité entre l'Afrique du nord et la Grande-Bretagne ; les interconnexions entre l'Europe et le Royaume-Uni doivent être augmentées pour passer de 2 GW à au moins 40 GW.

Voici où le plan L obtient ses 50 kWh/j/pers. d'électricité : l'éolien fournirait 8 kWh/j/pers. (20 GW en moyenne) (plus environ 400 GWh d'installations de stockage par pompage associées) ; le photovoltaïque, 3 kWh/j par pers. ; l'hydroélectricité et l'incinération des déchets, 1,3 kWh/j par pers. ; les vagues, 2 kWh/j/pers. ; les marées, 3,7 kWh/j/pers. ; le « charbon propre », 16 kWh/j/pers. (soit 40 GW) ; le solaire dans les déserts, 16 kWh/j/pers. (soit 40 GW de puissance moyenne).

Ce plan importe 64 % d'électricité du Royaume Uni de pays étrangers. J'ai appelé ce plan le « plan L » parce qu'il correspond assez bien aux politiques des libéraux-démocrates britanniques — du moins lorsque j'ai écrit la première version de ce chapitre en 2007 ; depuis, ils se sont mis à parler de « réelle indépendance énergétique pour le Royaume-Uni », annonçant une politique zéro-carbone, dans laquelle la Grande-Bretagne serait *exportatrice* nette d'énergie ; mais ils ne donnent aucun détail sur la manière dont ils comptent atteindre leurs objectifs.

Produire beaucoup d'électricité : le plan V

Certains disent : « on ne veut pas de nucléaire, *et* on ne veut pas de charbon non plus ! » Voilà qui paraît être un objectif attirant. Mais il nous faut un plan qui y réponde correctement. J'ai appelé ce plan le « plan V », parce qu'il me semble que le parti des Verts ne veut ni nucléaire, ni charbon — même si je ne suis pas sûr que tous les Verts apprécient beaucoup le reste du plan. Les gens de Greenpeace, je le sais, *adorent* le vent. Le plan V leur est donc aussi dédié, parce que dedans, il y a *beaucoup* de vent.

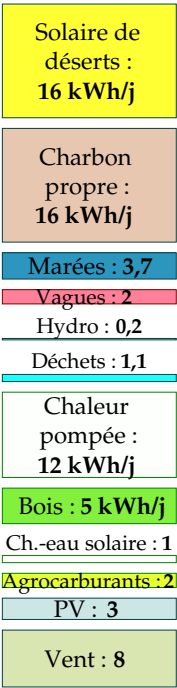


FIGURE 27.6. Plan L.

Pour élaborer le plan V, je suis à nouveau parti du plan D, dans lequel j'ai un peu augmenté la contribution des vagues, avec 1 kWh/j/pers. supplémentaire (en pompant de l'argent pour l'injecter dans la recherche sur l'énergie des vagues et améliorer le rendement du convertisseur énergétique Pelamis), dans lequel j'ai donné un gros coup de boost à l'éolien, avec une multiplication par quatre (par rapport au plan D), ce qui lui permet d'atteindre 32 kWh/j/pers. et de fournir 64 % de toute l'électricité demandée par les Britanniques. Cela correspond à une multiplication par 120 de la puissance éolienne actuellement installée au Royaume-Uni. Avec ce plan, le seul fait d'installer des éoliennes sur et autour des îles britanniques multiplierait par 4 la puissance éolienne *mondiale* par rapport à celle installée en 2008.

L'immense dépendance du plan V aux renouvelables, en particulier le vent, rend nettement plus difficile l'équilibrage entre fourniture et demande tel que nous l'avions envisagé, en l'occurrence en ajustant le rythme de recharge des batteries de voitures électriques utilisées pour le transport. Donc dans le plan V, il nous faut inclure des installations supplémentaires substantielles de stockage par pompage, qui soient capables d'équilibrer les fluctuations de vent à l'échelle de plusieurs jours. Ces installations de stockage par pompage correspondent à 400 Dinorwig, permettant de remplacer le vent durant une période de calme national de 2 jours. Il faudrait dédier en gros une centaine des principaux lacs et lochs de Grande-Bretagne à cet usage.

La production électrique du plan V se répartit comme suit : l'éolien fournirait 32 kWh/j/pers. (80 GW en moyenne) (plus environ 4 000 GWh d'installations de stockage par pompage associées) ; le photovoltaïque, 3 kWh/j/pers. ; l'hydroélectricité et l'incinération des déchets, 1,3 kWh/j par pers. ; les vagues, 3 kWh/j/pers. ; les marées, 3,7 kWh/j/pers. ; le solaire dans les déserts, 7 kWh/j/pers. (17 GW).

Ce plan importe 14 % de l'électricité du Royaume-Uni de pays étrangers.

Produire beaucoup d'électricité : le plan E

Le « plan E », c'est le plan des « économistes ». Ce cinquième plan est une estimation grossière de ce qui arriverait dans un marché de l'énergie libéralisé, avec un prix du carbone élevé. Sur un marché économique incorporant un signal-prix élevé pour limiter les émissions de CO₂, on ne s'attend pas à une solution diversifiée avec une large palette de coûts de puissance ; on s'attend plutôt à une solution économiquement optimale qui fournit la puissance requise au moindre coût. Et lorsque le prix du « charbon propre » et du nucléaire mèneront la course en tête à tête, c'est le nucléaire qui la gagnera. (Des ingénieurs rencontrés près d'un générateur électrique au Royaume-Uni m'ont indiqué que le coût en capital des centrales à charbon standard et *sales* était de l'ordre de 1,5 G€ par GW,

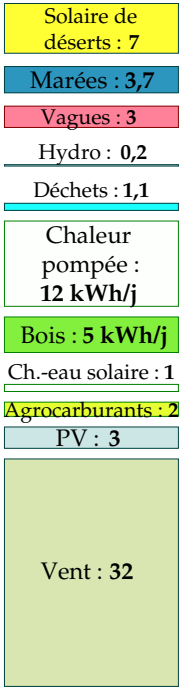


FIGURE 27.7. Plan V.

à peu près la même chose que pour les centrales nucléaires, mais le coût en capital des centrales à « charbon propre », y compris leur dispositif de capture et de séquestration du carbone, est en gros de 3 G€ par GW.) J'ai supposé que la puissance solaire provenant des déserts d'autres pays perdait de son intérêt économique face au nucléaire, dès lors que l'on prend en compte les coûts relatifs aux lignes électriques de 2 000 kilomètres de long (bien que van Voorthuysen (2008) reconnaisse qu'avec des développements dignes du prix Nobel dans la production solaire de combustibles chimiques, la puissance solaire des déserts pourrait être économiquement compétitive face au nucléaire). L'éolien offshore perd également face au nucléaire, mais j'ai supposé que les coûts de l'éolien terrestre restaient à peu près les mêmes que ceux du nucléaire.

Voici comment le plan E obtient ses 50 kWh/j/pers. d'électricité : l'éolien fournirait 4 kWh/j/pers. (soit 10 GW en moyenne) ; le photovoltaïque, 0 ; l'hydroélectricité et l'incinération des déchets, 1,3 kWh/j/pers. ; les vagues, 0 ; les marées, 0,7 kWh/j/pers. ; et le nucléaire, 44 kWh/j/pers. (110 GW).

Ce plan multiplie par dix notre puissance nucléaire par rapport à 2007. La Grande-Bretagne disposerait d'une capacité de production de 110 GW, c'est-à-dire à peu près le double du parc français actuel. J'ai inclus un peu de puissance marémotrice, parce que je suis convaincu qu'une installation de lagon marémoteur bien conçu peut être compétitive face au nucléaire.

Dans ce plan, la Grande-Bretagne n'importe plus d'énergie (excepté son uranium, qui, comme nous l'avons vu précédemment, n'est pas traditionnellement compté comme une importation).

La figure 27.9 montre les cinq plans ensemble.

Quel lien y a-t-il entre ces plans et le fait d'aspirer le carbone et de voyager dans les airs ?

Dans un monde futur dans lequel la pollution au carbone a un prix approprié pour éviter un changement climatique catastrophique, on s'intéressera à n'importe quel schéma de production de puissance qui peut, à faible coût, placer du carbone supplémentaire dans un trou dans le sol. De tels plans de neutralisation carbone pourraient nous permettre de continuer de prendre l'avion aussi souvent qu'en 2004 (et aussi longtemps qu'il y aura assez de pétrole pour cela). En 2004, les émissions de CO₂ du transport aérien étaient d'environ 0,5 tonne de CO₂ par personne et par an. En rendant compte de l'ensemble des conséquences de l'aérien sur l'effet de serre, les émissions effectives sont peut-être de l'ordre de 1 tonne eq CO₂ par personne et par an. Maintenant, dans chacun des cinq plans, j'ai supposé qu'un huitième du Royaume-Uni était dédié à la production de récoltes à des fins énergétiques, qui sont utilisées pour le chauffage ou la cogénération. Si, à la place, on dédie toutes ces récoltes à des centrales électriques avec capture et séquestration du carbone — les centrales à « charbon propre » qui apparaissaient dans trois des cinq plans — alors la

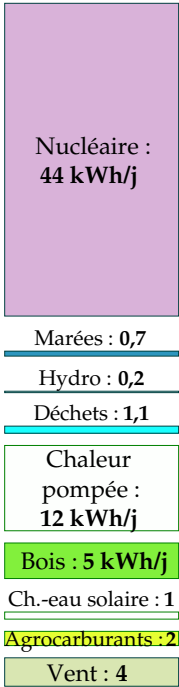


FIGURE 27.8. Plan E.

1 tonne eq CO₂ signifie des émissions de gaz à effet de serre équivalentes à une tonne de CO₂.

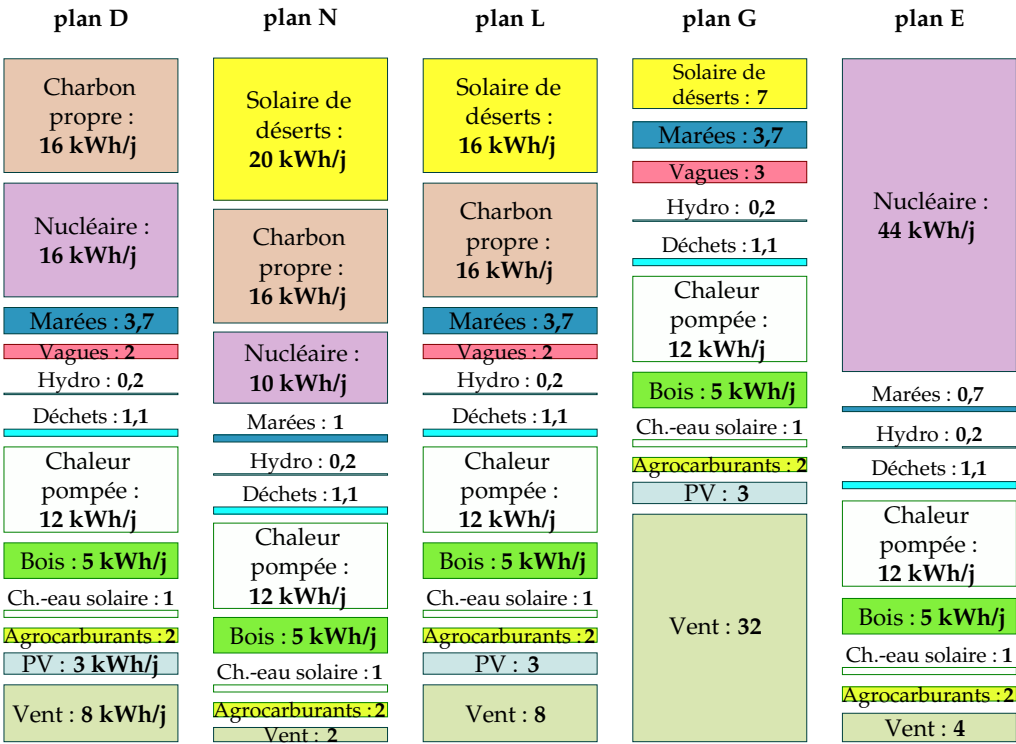


FIGURE 27.9. Les cinq plans ensemble.

quantité de CO₂ supplémentaire capturé serait d'environ 1 tonne de CO₂ par personne et par an. Si on plaçait les incinérateurs de déchets municipaux et agricoles au même endroit que les centrales à charbon propre, de sorte qu'ils puissent profiter des mêmes cheminées, le total capturé pourrait peut-être monter jusqu'à 2 tonnes de CO₂ par personne et par an. Un tel arrangement occasionnerait des coûts supplémentaires : cela imposerait de transporter plus loin la biomasse et les déchets ; le processus de capture du carbone mangerait une fraction significative de l'énergie des récoltes ; et la chaleur produite et non fournie aux bâtiments devrait être remplacée par des pompes à chaleur supplémentaires. Mais si notre objectif est la neutralité carbone, ça pourrait valoir le coup d'anticiper les choses pour essayer de construire les nouvelles centrales à charbon propre avec les incinérateurs de déchets, dans des zones proches de potentielles plantations de biomasse.

« Tous ces plans n'ont aucun sens ! »

Vous n'aimez pas ces plans ? Ça ne m'étonne pas. Il y a quelque chose de désagréable à entendre dans chacun d'entre eux, je vous l'accorde. Mais je vous en prie, faites : élaborer vous-même un plan plus à votre goût. Assurez-vous seulement qu'avec votre plan, le compte soit bon !

Peut-être finirez-vous par arriver à la conclusion qu'un plan viable doit forcément impliquer une puissance par habitant plus faible. Je pourrais être d'accord avec vous, mais c'est une politique particulièrement ardue à vendre aux gens — rappelez-vous la réponse de Tony Blair (page 263) lorsqu'on lui a suggéré qu'il devrait prendre l'avion et traverser les océans pour ses vacances un peu moins souvent !

Il est possible qu'une autre conclusion à laquelle vous arriviez soit que notre densité de population est trop élevée, et qu'un plan ne peut être viable qu'avec moins de personnes. Là encore, c'est une politique quelque peu difficile à vendre.

Notes et bibliographie

Page n°

244 *Incinérer 1 kg de déchets permet d'obtenir en gros 0,5 kWh d'électricité.*

La valeur calorifique des déchets solides municipaux est d'environ 2,6 kWh par kg ; les centrales qui brûlent ces déchets produisent de l'électricité avec un rendement d'environ 20 %. Source : SELCHP tour guide.

– *Figure 27.3.* Les données proviennent d'Eurostat, www.epa.gov et www.esrcsocietytoday.ac.uk/ESRCInfoCentre/.

248 *Les politiques des libéraux-démocrates.* Voir www.libdems.org.uk : [5os7dy], [yrw2oo].

28 Remettre les coûts en perspective

Un plan sur une carte

Si vous le permettez, je vais essayer de rendre un peu plus palpable l'échelle des plans du chapitre précédent, en vous montrant une carte de la Grande-Bretagne dans laquelle serait mis en œuvre un sixième plan. Ce sixième plan se situe à peu près à mi-chemin des cinq premiers : je l'appellerai donc le plan M, le plan « médian » (figure 28.1).

Le tableau 28.3 montre les superficies et les coûts approximatifs de ces installations. Pour que ce soit plus simple, les coûts financiers sont estimés en utilisant les prix actuels pour des installations comparables, dont la plupart en sont au stade de prototypes. On peut s'attendre à ce que beaucoup de ces prix chutent de façon importante. Les coûts approximatifs qui sont donnés ici sont les coûts de construction, et ne prennent pas en compte les coûts d'exploitation ou de démantèlement. On trouve les coûts « par personne » en divisant le coût total par 60 millions. Surtout, souvenez-vous que ce livre n'est pas un livre d'économie — il lui faudrait 400 pages de plus ! Je ne fournis ces estimations de coût que pour donner une indication *grossière* de la facture à laquelle il faut s'attendre pour mettre en place un plan dont le compte est bon.

J'aimerais mettre l'accent sur le fait que je ne recommande pas ce plan en particulier — il inclut plusieurs éléments qu'en tant que dictateur de la Grande-Bretagne, je ne choisirais pas. J'ai délibérément inclus toutes les technologies disponibles, de sorte que vous puissiez essayer de construire vos propres plans en faisant des combinaisons différentes.

Par exemple, si vous dites « le photovoltaïque va être trop cher ; à la place, je voudrais un plan tirant plus d'énergie à partir des vagues », vous voyez ce qu'il faut faire : il vous faut multiplier les fermes à vagues par un facteur huit. Si vous n'aimez pas l'endroit choisi pour les fermes éoliennes, vous êtes libre de les déplacer (mais où ?). Gardez à l'esprit que mettre plus d'éoliennes en pleine mer augmentera le coût de l'éolien. Si vous préférez moins de fermes éoliennes, pas de souci — il vous suffit d'indiquer lesquelles parmi les autres technologies vous préférez voir développées à la place. Vous pouvez remplacer cinq des fermes éoliennes de 100 km² en ajoutant une centrale nucléaire de 1 GW supplémentaire, par exemple.

Peut-être trouverez-vous que ce plan (tout comme les cinq autres plans du chapitre précédent) dédie une surface déraisonnable aux biocarburants. Très bien : vous pourrez donc conclure que la demande en carburants liquides pour le transport doit être réduite sous les 2 kWh par jour et par personne dont ce plan fait l'hypothèse ; ou que les carburants liquides doivent être produits d'une autre manière.

Solaire de déserts : 16 kWh/j
Charbon propre: 3
Nucléaire : 16 kWh/j
Marées : 3,7
Vagues : 0,3
Hydro : 0,2
Déchets : 1,1
Chaleur pompée : 12 kWh/j
Bois : 5 kWh/j
Ch.-eau solaire : 1
Agrocarburants : 2
PV : 2
Vent : 8

FIGURE 28.1. Le plan M.

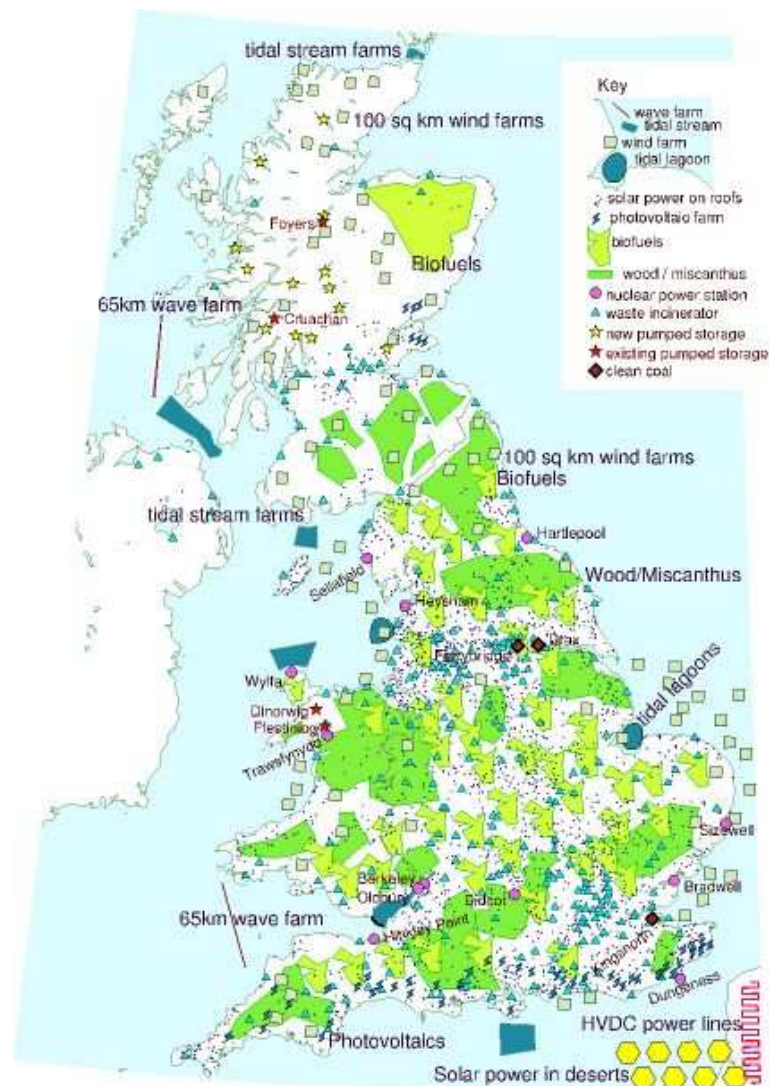


FIGURE 28.2. Un plan pour l'Écosse, l'Angleterre et le Pays de Galles, dont le compte est bon.

Les carrés gris-vert sont des fermes éoliennes. Chacune couvre une superficie de 100 km², et est montrée à l'échelle.

Les lignes rouges dans la mer sont des fermes à vagues, montrées à l'échelle.

Les polygones bleu clair en forme d'éclair sont des fermes photovoltaïques — 20 km² chacune, montrées à l'échelle.

Les polygones bleus aux coins pointus dans la mer : des fermes marémotrices.

Les tâches bleues dans la mer (Blackpool et la Wash) : des lagons marémoteurs.

Les zones de terres en vert clair : bois et taillis à rotation courte (à l'échelle).

Les zones en jaune-vert : cultures de production de biocarburants (à l'échelle).

Les petits triangles bleus : centrales d'incinération de déchets (pas à l'échelle).

Les gros losanges marrons : centrales à charbon propre, avec co-combustion de biomasse, et capture et séquestration de carbone (pas à l'échelle).

Les points violets : centrales nucléaires (pas à l'échelle) — 3,3 GW de production moyenne sur chacun des 12 sites.

Les hexagones jaunes de l'autre côté de la Manche : installations solaires à concentration dans des déserts lointains (à l'échelle, compter 335 km² par hexagone). La ligne rose en serpent sur la France représente les nouvelles lignes à haute tension en courant continu (HTCC) de 2 000 kilomètres de long, permettant le transport de 40 GW depuis les déserts lointains jusqu'au Royaume-Uni.

Les petites étoiles jaunes en Écosse : nouvelles installations de stockage par pompage.

Les petites étoiles rouges : installations existantes de stockage par pompage.

Les points bleus : les panneaux solaires pour l'obtention d'eau chaude sur tous les toits.

	Capacité	Coût approxim.		Puissance moyenne fournie
		total	par personne	
52 fermes éoliennes : 5 200 km ²	35 GW	33 G€ — basé sur la ferme éolienne de Lewis	550 €	4,2 kWh/j/pers.
29 fermes éoliennes en mer : 2 900 km ²	29 GW	45 G€ — basé sur la ferme des Kentish Flats, y compris l’investis- sement de 4 G€ pour les barges élévatrices.	750 €	3,5 kWh/j/pers.
Stockage par pompage : 15 installations de type Dinorwig	30 GW	18 G€	300 €	
Parcs photovoltaïques : 1 000 km ²	48 GW	240 G€ — basé sur le Solarpark en Bavière	4 000 €	2 kWh/j/pers.
Panneaux solaires thermiques : 1 m ² de panneaux de toit par personne. (60 km ² au total)	2,5 GW(th) en moyenne	90 G€	1 500 €	1 kWh/j/pers.
Incinérateurs de déchets : 100 incinérateurs de 30 MW	3 GW	11 G€ — basé sur le SELCHP	185 €	1,1 kWh/j/pers.
Pompes à chaleur	210 GW(th)	75 G€	1 200 €	12 kWh/j/pers.
Fermes à vagues — 2 500 Pelamis, 130 km de mer	1,9 GW (0,76 GW en moyenne)	8 G€?	130 €	0,3 kWh/j/pers.
Barrage de la Severn : 550 km ²	8 GW (2 GW en moyenne)	18 G€	300 €	0,8 kWh/j/pers.
Lagons marémoteurs : 800 km ²	1,75 GW en moyenne	3,3 G€?	60 €	0,7 kWh/j/pers.
Flux de marée : 15 000 turbines — 2 000 km ²	18 GW (5,5 GW en moyenne)	25 G€?	440 €	2,2 kWh/j/pers.
Nucléaire : 40 stations	45 GW	75 G€ — basé sur Olkiluoto, en Finlande	1 200 €	16 kWh/j/pers.
Charbon propre	8 GW	20 G€	330 €	3 kWh/j/pers.
Solaire à concentration dans les déserts : 2 700 km ²	40 GW en moyenne	430 G€ — basé sur Solúcar	7 000 €	16 kWh/j/pers.
Terres en Europe pour 1 600 km de lignes HTCC : 1 200 km ²	50 GW	1,2 G€ — en supposant qu’un hectare de terres coûte 10 000 €	20 €	
2 000 km de lignes HTCC	50 GW	1,2 G€ — basés sur les estimations du Centre aérospatial allemand	20 €	
Biocarburants : 30 000 km ²		(coût non estimé)		2 kWh/j/pers.
Bois/Miscanthus : 31 000 km ²		(coût non estimé)		5 kWh/j/pers.

TABLEAU 28.3. Surfaces de terres et de mer requises par le plan M, et coûts approximatifs. Les coûts avec un point d’interrogation concernant les technologies pour lesquelles aucun prototype n’a encore fourni de coût précis. « 1 GW(th) » dénote un gigawatt de puissance thermique.

Coût du passage des combustibles fossiles aux renouvelables

Chaque ferme éolienne coûte quelques millions d'euros pour être construite, et elle fournit quelques mégawatts. Comme chiffre très approximatif pour 2008, installer un watt de capacité coûte 1,50 € ; un kilowatt coûte 1 500 € ; un mégawatt de vent coûte un million et demi d'euros ; un gigawatt de nucléaire coûte autour de deux milliards d'euros. D'autres renouvelables coûtent plus cher. Le Royaume-Uni consomme actuellement une puissance totale d'environ 300 GW, essentiellement des combustibles fossiles. On peut donc s'attendre au fait qu'un transfert majeur des combustibles fossiles aux renouvelables et/ou au nucléaire va imposer en gros 300 GW de renouvelables et/ou de nucléaire, et que ça coûtera, en première approximation, dans les 400 à 500 milliards d'euros. Les coûts approximatifs du tableau 28.3 atteignent 1 200 milliards d'euros, le coût des installations solaires dominant le total — le photovoltaïque coûtant près de 250 milliards d'euros, et les centrales solaires à concentration près de 500 milliards d'euros. Ces deux coûts pourraient bien baisser de manière importante avec la pratique. Un rapport interne du gouvernement dévoilé par *The Guardian* en août 2007 estime qu'atteindre « 20 % pour 2020 » (c'est-à-dire 20 % de toute notre énergie provenant des renouvelables, ce qui obligerait à augmenter notre production de puissance renouvelable de 80 GW) coûterait « jusqu'à 28 milliards d'euros » (ce qui ferait, en moyenne, 2,2 milliards d'euros par an). Même si cette estimation est plus faible que les 100 milliards d'euros calculés de manière empirique et que j'ai précédemment mentionnés, les auteurs du rapport qui a fuité semblent considérer que 28 milliards d'euros sont un coût « déraisonnable », préférant un objectif de seulement 9 % de renouvelables. (Ils donnent une autre raison pour laquelle l'objectif des « 20 % d'ici 2020 » leur déplaît : les économies de gaz à effet de serre qui en résulteraient « risqueraient de rendre inutile le plan de quotas d'émissions de l'Union européenne ». Que voilà une pensée terrifiante !)

Deux ou trois autres choses qui coûtent des milliards

Des milliards, ce sont de gros chiffres, qu'on a du mal à se représenter. Pour essayer de remettre en perspective le coût de l'éviction des combustibles fossiles, faisons maintenant une liste de quelques autres choses qui coûtent aussi des milliards d'euros, ou des milliards par an. J'exprimerai nombre de ces dépenses « par personne », en divisant le total par une population d'une taille appropriée.

Sans doute le montant le plus pertinent que l'on puisse utiliser pour faire des comparaisons, c'est l'argent que l'on dépense *déjà* annuellement pour notre fourniture d'énergie. Au Royaume-Uni, l'argent que dépensent les consommateurs finaux pour l'énergie est de 100 milliards d'euros par an, et la valeur marchande totale de toute l'énergie consommée est de

170 milliards d’euros par an. L’idée de dépenser 2,2 milliards d’euros par an pour investir dans la future infrastructure énergétique ne semble donc pas du tout déraisonnable — cela fait moins de 3 % de nos dépenses actuelles pour l’énergie !

Une autre bonne comparaison à faire est celle de nos dépenses d’assurance actuelles : certains des investissements qu’il nous faudra faire offrent un retour sur investissement incertain — exactement comme une assurance. Au Royaume-Uni, les particuliers et les entreprises dépensent 110 milliards d’euros par an en assurances.

Subventions

70 milliards d’euros sur 25 ans : le coût du démantèlement des centrales nucléaires et des installations de fabrication des armes nucléaires au Royaume-Uni. C’est le chiffre de 2004 ; en 2008, il atteignait 90 milliards d’euros (soit 1 500 euros par personne au Royaume-Uni). [6eoyhg]

Transport

5,4 milliards d’euros : le coût du terminal 5 de l’aéroport londonien d’Heathrow (90 euros par personne au Royaume-Uni).

2,3 milliards d’euros : le coût pour élargir 91 kilomètres de l’autoroute M1, qui relie Londres à Manchester (entre les échangeurs 21 et 30, figure 28.4). [yu8em5]. (38 euros par personne au Royaume-Uni.)

Occasions spéciales

Coût des Jeux Olympiques de Londres 2012 : 3 milliards d’euros ; ah, non, désolé, 6,2 milliards d’euros [3x2cr4] ; ou peut-être plus de 11 milliards d’euros, finalement [2dd4mz]. (Cela fait 190 euros par personne au Royaume-Uni.)

Les affaires sont les affaires

3,1 milliards d’euros par an : profits de Tesco (annoncés en 2007). (52 euros par personne au Royaume-Uni et par an.)

12,7 milliards d’euros par an : dépensés par les Britanniques pour de la nourriture qu’ils achètent mais ne mangent pas. (210 euros par personne au Royaume-Uni et par an.)

13 milliards d’euros par an : profits de BP (2006).

16 milliards d’euros par an : profits de la Royal Dutch Shell (2006).

40 milliards de dollars par an : profits d’Exxon (2006).

33 milliards de dollars par an : dépenses mondiales en parfums et maquillage.

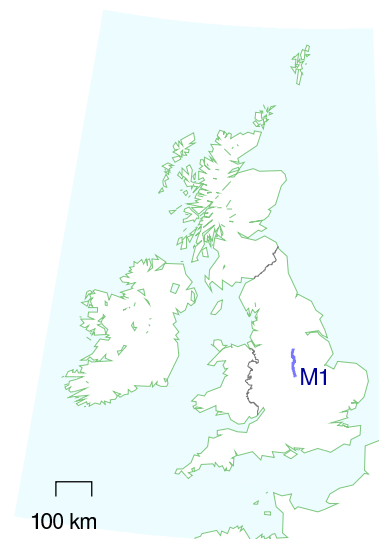


FIGURE 28.4. L’autoroute M1, entre les échangeurs 21 et 30.

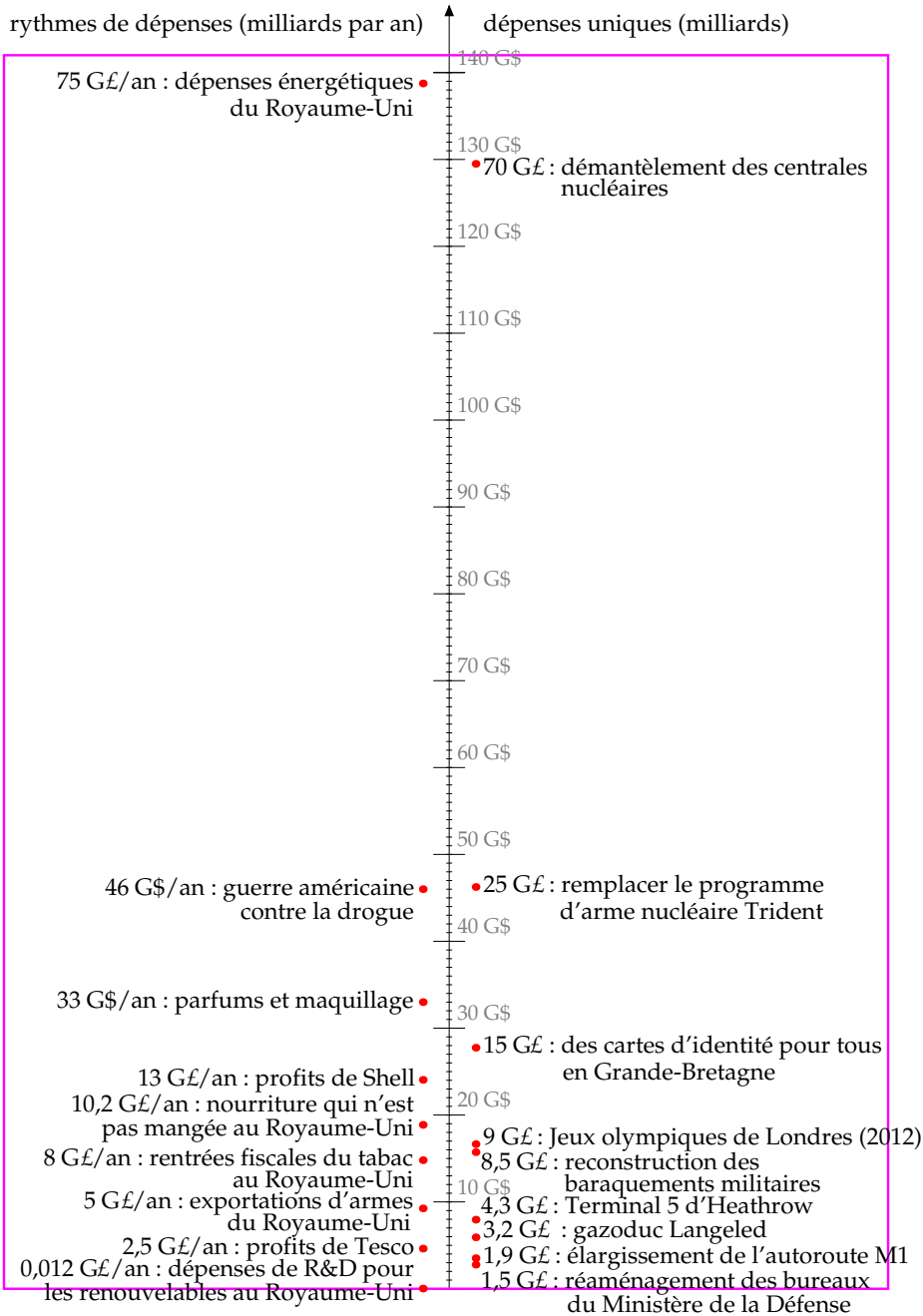


FIGURE 28.5. Des choses qui pèsent des milliards. L'échelle verticale au milieu porte des graduations principales tous les 10 milliards de dollars et des graduations secondaires tous les milliards de dollars.

700 milliards de dollars par an : dépenses des États-Unis pour acheter du pétrole étranger (2008). (2 300 dollars par personne aux États-Unis et par an.)

Les petites affaires du gouvernement

1,9 milliards d'euros : le coût de la remise à neuf des bureaux du ministère de la Défense (*Private Eye* n° 1176, 19 janvier 2007, page 5.) (31 euros par personne au Royaume-Uni.)

19 milliards d'euros : le coût de l'introduction d'un système de carte d'identité au Royaume-Uni [7v1xp]. (310 euros par personne au Royaume-Uni.)

Se préparer à l'avenir

4 milliards d'euros : le coût du gazoduc Langeled, qui relie les zones de production de gaz norvégiennes à la Grande-Bretagne. La capacité du pipeline est de 20 milliards de m³ par an, ce qui correspond à une puissance de 25 GW. [6x4nvu] [39g2wz] [3ac8sj]. (66 euros par personne au Royaume-Uni.)

Taxes sur le tabac et autres jeux

10 milliards d'euros par an : les revenus annuels des taxes sur le tabac au Royaume-Uni [y7kg26]. (160 livres par personne au Royaume-Uni et par an.) L'Union européenne dépense presque 1 milliard d'euros par an en subventions pour la tabaculture. www.ash.org.uk

46 milliards de dollars par an : le coût annuel de la « Guerre contre la drogue » américaine. [r9fxf] (150 dollars par personne aux États-Unis et par an.)

Espace

1,7 milliards de dollars : le coût d'une navette spatiale. (6 dollars par personne aux États-Unis et par an.)

Banques

700 milliards de dollars : en octobre 2008, le gouvernement américain s'est engagé à renflouer Wall Street à hauteur de 700 milliards de dollars, et puis aussi...

500 milliards de livres sterling : le gouvernement britannique s'est engagé à renflouer les banques britanniques à hauteur de 500 milliards de livres sterling (620 milliards d'euros).



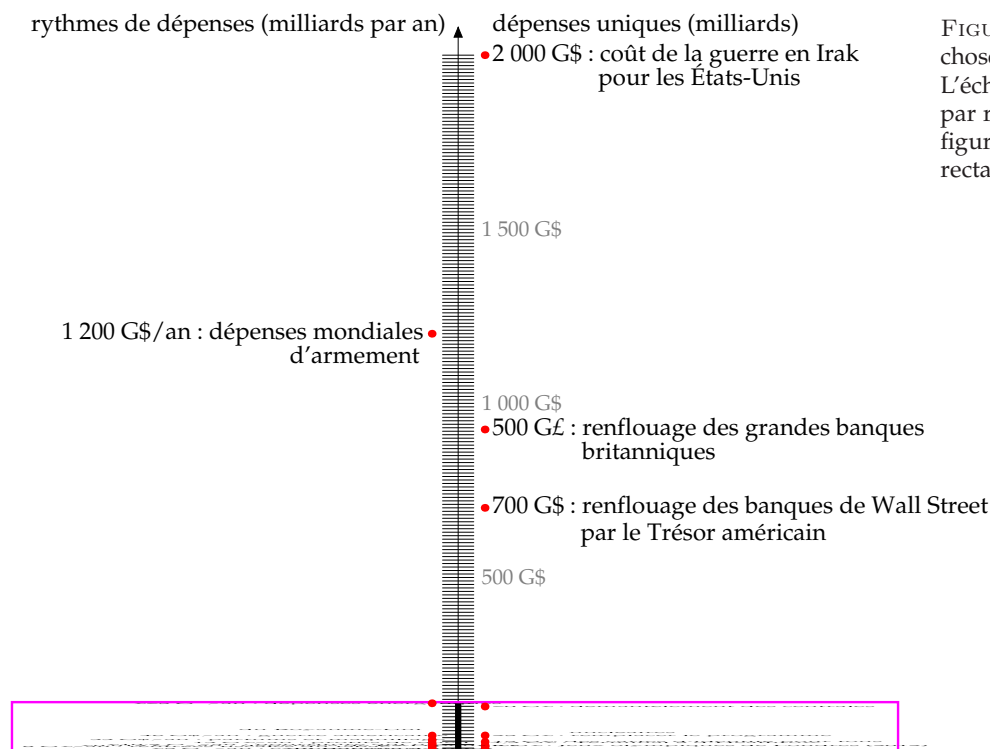


FIGURE 28.6. Deux ou trois autres choses qui pèsent des milliards. L'échelle verticale est réduite 20 fois par rapport à la figure précédente, la figure 28.5, qui est montrée ici dans le rectangle violet.

Dépenses militaires

6,2 milliards d'euros par an : les exportations d'armes du Royaume-Uni (104 euros par personne au Royaume-Uni et par an), dont 3,1 milliards d'euros vont au Moyen-Orient, et plus d'un milliard à la seule Arabie saoudite. Source : *The Observer*, 3 décembre 2006.

10,6 milliards d'euros : le coût de la rénovation des bâtiments militaires à Aldershot et Salisbury Plain (180 euros par personne au Royaume-Uni.)

4,8 milliards d'euros : le coût de deux nouveaux avions cargo (80 euros par personne au Royaume-Uni.) news.bbc.co.uk/1/low/scotland/6914788.stm

4,5 milliards de dollars par an : le coût de la non-fabrication des armes nucléaires — le budget du Département américain de l'énergie alloue au moins 4,5 milliards de dollars par an pour les activités « d'intendance des stocks » liées à la maintenance de l'arsenal nucléaire *sans* essai nucléaire et *sans* production à large échelle de nouvelles armes. (15 dollars par personne aux États-Unis et par an.)

12 à 30 milliards d'euros par an : le coût du remplacement du Trident, le système d'armes nucléaires britannique (210 à 520 euros par personne au Royaume-Uni et par an) [ysncks].

63 milliards de dollars : la donation américaine pour « l'assistance militaire » (en clair : des armes) au Moyen-Orient sur 10 ans — en gros, la moitié à Israël et la moitié aux pays arabes. [2vq59t] (210 dollars par per-

sonne aux États-Unis.)

1 200 milliards de dollars par an : les dépenses mondiales d'armement [ym46a9]. (200 dollars par personne dans le monde et par an.)

2 000 milliards de dollars ou plus : le coût pour les États-Unis de la guerre en Irak [99bpt] selon l'économiste et prix Nobel Joseph Stiglitz (7 000 dollars par personne aux États-Unis et par an.)

Selon le rapport Stern, le coût global pour éviter un changement climatique dangereux (si l'on agit maintenant) est de 440 milliards de dollars par an (440 dollars par an et par personne, en répartissant de manière égale entre le milliard de personnes les plus riches). En 2005, le seul gouvernement américain a dépensé 480 milliards de dollars pour les guerres et la préparation à la guerre. Les dépenses militaires totales des 15 pays les plus dépensiers en matière d'armement était de 840 milliards de dollars.

Une dépense qui ne pèse pas des milliards

0,015 milliard d'euros par an : la plus petite dépense que montre la figure 28.5. C'est l'investissement annuel du gouvernement britannique en recherche et développement sur les énergies renouvelables. (0,25 euro par personne au Royaume-Uni et par an).

Notes et bibliographie

254 *Figure 28.2.* J'ai supposé que les fermes photovoltaïques avaient une puissance par unité de surface de 5 W/m², similaires à la ferme bavaroise de la page 48, donc chaque ferme sur la carte fournit 100 MW en moyenne. Leur production moyenne totale serait de 5 GW, ce qui requiert en gros 50 GW de capacité en crête (soit 16 fois la capacité photovoltaïque allemande en 2006).

Chacun des hexagones jaunes représentant le solaire a une puissance moyenne de 5 GW ; deux de ces hexagones sont nécessaires pour alimenter une des « taches » du chapitre 25.

256 *Un rapport interne du gouvernement dévoilé par The Guardian...* Le quotidien *The Guardian* rapportait le 13 août 2007 [2bmuod], que « les fonctionnaires gouvernementaux ont informé en secret leurs ministres de tutelle que la Grande-Bretagne n'avait aucune chance d'atteindre, ni même d'approcher les nouveaux objectifs d'énergie renouvelable de l'Union européenne auxquels Tony Blair s'était engagé au printemps — et ils ont suggéré qu'ils trouveraient le moyen pour la Grande-Bretagne de se défilier. »

Le document dévoilé est accessible sur [3g8nn8].

257 *...parfum ...* Source : Worldwatch Institute
www.worldwatch.org/press/news/2004/01/07/

261 *...les guerres et la préparation à la guerre ...* www.conscienceonline.org.uk

- *L'investissement du gouvernement dans la recherche et développement des énergies renouvelables.* En 2002–2003, l'engagement du gouvernement britannique dans la recherche et développement associée aux énergies renouvelables était de 12,2 millions de livres sterling (environ 15 millions d'euros). Source : Comité Science et Technologies de la Chambre des Lords, 4^e rapport de session 2003–2004. [3jo7q2]

Comparable dans sa petitesse, on trouve aussi l'allocation attribuée par le gouvernement au programme des bâtiments à faible empreinte carbone (*Low Carbon Buildings Programme*), qui se montait à 0,018 milliard de livres sterling par an

(environ 0,022 milliard d'euros par an), partagée entre l'éolien, la biomasse, le solaire (thermique et photovoltaïque), les pompes à chaleur géothermiques, le micro-hydroélectrique et la micro-cogénération.

29 Qu'est-ce qu'on fait maintenant ?

Si nous n'agissons pas maintenant — pas dans un futur proche, mais maintenant — ces conséquences si désastreuses seront alors irréversibles. Il n'y a donc rien qui soit plus sérieux, plus urgent ou qui exige plus que l'on montre l'exemple.

Tony Blair, 30 octobre 2006

assez malaisé en pratique. . .

Tony Blair, deux mois plus tard,
répondant à la suggestion qui venait de lui être
faite de *montrer lui-même l'exemple* en ne prenant
pas l'avion pour partir en vacances à la Barbade.

Ce que nous devrions faire dépend en partie de la nature de nos motivations. Rappelez-vous qu'en page 5, nous avons détaillé trois raisons pour abandonner les combustibles fossiles : la fin des combustibles fossiles bon marché ; la sécurité de l'approvisionnement ; et le changement climatique. Supposons tout d'abord que le changement climatique nous pousse à agir — et que nous voulons réduire les émissions de carbone de manière drastique. (Quiconque ne croit pas au changement climatique peut sauter cette partie et nous rejoindre en page 266.)

Que faire contre la pollution au carbone ?

Nous ne sommes pas sur le chemin d'un futur sans carbone. L'investissement à long terme ne vient pas. Les sociétés de séquestration de carbone ne prospèrent pas, même si, de l'opinion des experts du climat tout comme celui des économistes, aspirer du carbone de l'air sera très probablement nécessaire pour éviter un changement climatique dangereux. Le carbone n'est même pas capturé dans une seule centrale à charbon (à part dans un tout petit prototype en Allemagne).

Pourquoi donc ?

Le principal problème est le prix de la pollution au carbone, qui n'est pas fixé correctement. Et rien ne suggère qu'il sera fixé correctement dans un avenir proche. Quand je dis « correctement », je veux dire que le prix de l'émission de dioxyde de carbone devrait être assez élevé pour que toutes les centrales à charbon en activité incluent un dispositif de capture et de séquestration du carbone.

Résoudre le problème du changement climatique est un sujet complexe, mais, esquissée d'un simple trait de plume, voici la solution : le prix du dioxyde de carbone devrait être suffisamment élevé pour que les gens *cessent de brûler du charbon sans système de capture*. L'essentiel de la solution se trouve dans ce trait de plume parce que, à long terme, le charbon sera le principal combustible fossile. (Essayer de réduire les émissions provenant

du gaz et du pétrole est d'une importance secondaire, parce que les réserves exploitables de pétrole comme de gaz devraient décliner fortement durant les 50 prochaines années.)

Que doivent donc faire les dirigeants politiques ? Ils doivent s'assurer que toutes les centrales à charbon disposent d'un dispositif de capture du carbone. La première étape pour aller dans cette direction, c'est, pour les gouvernements, de financer un projet de démonstration à grande échelle pour sélectionner la meilleure technologie de capture et de séquestration du carbone ; ensuite, c'est que les politiciens modifient les réglementations à long terme qui régissent les centrales électriques, afin que la technologie optimisée soit adoptée partout. Je fais une proposition toute simple : promulguer une loi qui dit que — à partir d'une date donnée — *toutes les centrales à charbon doivent utiliser la capture du carbone*. Cependant, la plupart des élus des pays démocratiques semblent croire que la meilleure manière de fermer une porte, c'est de créer un marché de permis-à-laisser-la-porte-ouverte. Donc, si l'on se conforme au dogme selon lequel la solution au changement climatique reposera sur la loi du marché, quelle solution basée sur les marchés nous permettra-t-elle d'atteindre notre objectif de base — à savoir, la capture du carbone dans toutes les centrales à charbon ? Eh bien, on peut s'amuser à coincer la bulle de carbone — en échangeant des permis d'émissions de carbone et des certificats de capture de carbone, un certificat de capture d'une tonne de carbone étant convertible en permis d'émissions d'une tonne de carbone. Mais les propriétaires de centrales à charbon n'investiront dans la capture et la séquestration de carbone qu'à condition d'être convaincus que le prix du carbone sera assez élevé pendant suffisamment de temps pour que les installations de capture de carbone puissent être rentabilisées. Les experts indiquent qu'un prix du carbone, garanti à long terme, de l'ordre de 100 dollars par tonne de CO₂ devrait faire l'affaire.

Il faudrait donc que les dirigeants politiques s'accordent sur des réductions à long terme des émissions de CO₂ qui soient suffisamment fortes, pour que les investisseurs aient la conviction que le prix du carbone augmentera de manière permanente jusqu'à atteindre au moins 100 dollars par tonne de CO₂. Autre possibilité : ils pourraient délivrer des permis de pollution de carbone vendus aux enchères avec un prix minimum fixé à l'avance. Une autre possibilité encore serait que les gouvernements offrent leur garantie aux investissements dans la capture du carbone, en s'engageant à racheter tous les certificats de capture du carbone à un prix de 100 dollars par tonne de CO₂, quoi qu'il arrive sur le marché des permis d'émissions de carbone.

Mais je continue de me demander si le plus sage ne serait pas encore de fermer immédiatement la porte, plutôt que de tripatouiller un marché international qui n'a que l'intention d'encourager les gens à fermer la porte.

La politique énergétique de Grande-Bretagne n'est tout simplement pas à la hauteur. Elle n'apportera pas la sécurité. Elle ne permettra



FIGURE 29.1. Nous voilà bien avancés ! Le prix, en euros, d'une tonne de CO₂ durant la première période du plan européen de quotas d'émissions. Source : www.eex.com.

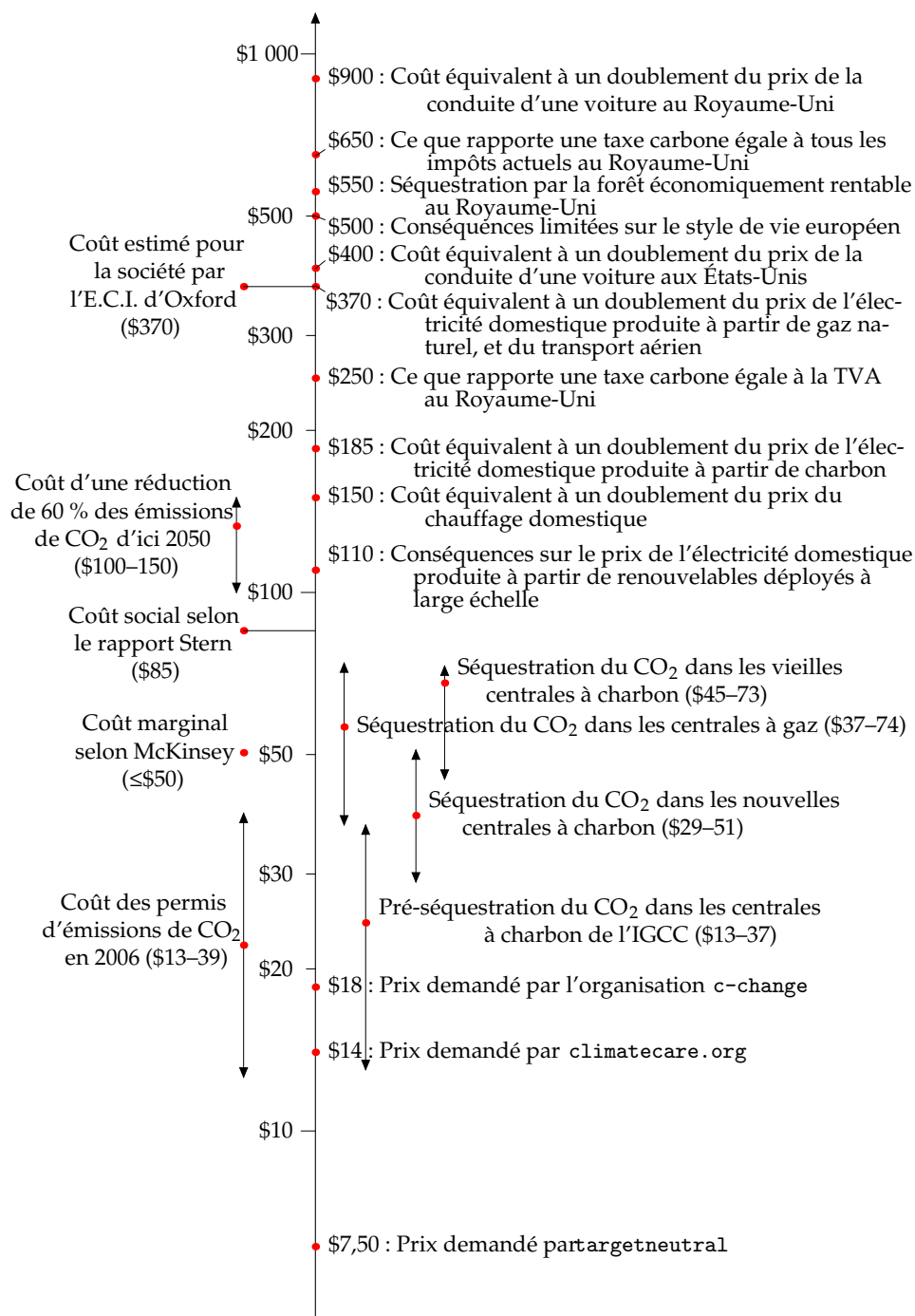


FIGURE 29.2. Quel prix de CO₂ pousserait la société à réduire notablement sa pollution en CO₂ ? Le diagramme montre des coûts de CO₂ qui rendent économiquement rentables certains investissements, ou qui ont un effet notable sur certains comportements. On considère que le coût du carbone a un effet notable sur le comportement des acteurs économiques pour une activité particulière (prendre l'avion, conduire une voiture, ...) lorsqu'il double le coût de l'activité.

\$20 à \$70 la tonne de CO₂ est assez cher pour rendre économiquement rentable l'installation de dispositifs de capture du carbone sur les centrales à charbon existantes et nouvelles. Un prix de \$110 la tonne ferait passer des projets de génération d'électricité renouvelable à grande échelle qui, aujourd'hui, coûtent 0,04 €/kWh de plus que le gaz, de l'état de chimères à l'état d'entreprises financièrement viables. Par exemple, le barrage sur la Severn (en projet) pourrait produire de la puissance à un coût de 0,068 €/kWh, ce qui est 0,037 € au dessus du prix typique de revente de l'électricité en Grande-Bretagne (0,031 €/kWh). Si chaque MWh qu'il générerait évitait d'émettre 1 tonne de CO₂ valorisée à 70 euros, le barrage serait plus que rentabilisé.

A \$150 la tonne, les particuliers verraient le coût du carbone sur leur facture de chauffage au gaz. \$250 la tonne augmenterait le coût réel d'un baril de pétrole de \$100. A \$370 la tonne, la pollution au carbone coûterait suffisamment cher pour réduire significativement l'attraction des gens pour l'avion. A \$500 la tonne, les Européens moyens qui ont gardé leur style de vie pourraient dépenser 12 % de leurs revenus dans les coûts du carbone émis pour conduire, prendre l'avion et chauffer leur logement avec du gaz. Et à \$900/t, le coût du carbone deviendrait notable au moment de prendre le volant.

*pas de répondre à nos engagements sur le changement climatique.
Elle ne répond pas aux besoins des pays les plus pauvres du monde.*

Lord Patten of Barnes, Président du groupe de travail de
l'université d'Oxford
sur l'énergie et le changement climatique, 4 juin 2007.

Que faire pour notre approvisionnement en énergie ?

Élargissons à présent le socle de nos motivations, et considérons que nous voulons abandonner les combustibles fossiles pour assurer la sécurité de notre approvisionnement énergétique.

Que devrions-nous faire pour amorcer le développement d'un approvisionnement en énergie non fossile et de mesures d'efficacité énergétique ? On peut avoir l'attitude suivante : « Laissez faire le marché. Au fur et à mesure que les combustibles fossiles se renchériront, les renouvelables et le nucléaire deviendront comparativement plus rentables, et le consommateur rationnel préférera les technologies efficaces ». Je trouve étrange que l'on puisse avoir une telle foi dans les marchés, vue la fréquence avec laquelle les marchés nous alimentent en krachs et en faillites, en contractions du crédit et en effondrements de banques. Les marchés sont peut-être de bons guides pour les décisions à court terme — sur les investissements qui se révéleront payants dans les dix ans qui viennent — mais peut-on espérer de bonnes décisions des marchés au sujet de l'énergie, des décisions dont les conséquences se feront sentir pendant de nombreuses décennies, voire des siècles ?

Si on laisse le libre marché construire des maisons, on finit par avoir des maisons mal isolées. Les maisons modernes ne sont efficaces en énergie que parce qu'il y a une législation qui les y oblige.

Le libre marché n'a pas la responsabilité de construire des routes, des voies de chemin de fer, des lignes de bus en site propre, des parkings ou des pistes cyclables. Mais la construction de routes et la mise à disposition de parkings ou de pistes cyclables ont des conséquences notables sur les choix de transport des gens. De la même manière, les lois d'aménagement du territoire, qui fixent où et avec quelle densité des habitations et des zones d'activité peuvent être construites, ont une influence énorme sur les futurs choix de déplacements de la population. Si une ville nouvelle est créée sans aucune gare de chemin de fer, il est peu probable que les habitants de cette ville choisissent le train pour leurs longs trajets. Si les zones d'habitation et les zones d'activité économique sont éloignées de plus que quelques kilomètres, de nombreuses personnes auront le sentiment qu'elles n'ont pas d'autre choix que de prendre le volant pour aller travailler.

L'une des plus grosses pompes à énergie, c'est la fabrication de tous nos trucs. Dans un marché libre, de nombreux fabricants nous proposent des trucs dont l'obsolescence est planifiée, des trucs qui doivent être jetés et remplacés, permettant à ces fabricants de faire de juteuses affaires.

Donc, même si les marchés peuvent avoir un rôle à jouer, dire « les marchés vont *tout* régler » est stupide. Indéniablement, nous devons parler de lois, de réglementations et d'impôts.

Verdir notre système fiscal

Il faut une profonde révision [des prélèvements obligatoires]. L'objectif est de taxer plus les pollutions, notamment les énergies fossiles, et de taxer moins le travail.

Nicolas Sarkozy, Président de la République Française

Pour l'instant, si mon micro-ondes, mon lecteur DVD ou mon aspirateur fonctionnent mal, il est beaucoup moins cher d'en acheter de nouveaux que de faire réparer les anciens. C'est dingue.

Cette folie est en partie due à notre système d'imposition, qui taxe le travail du réparateur de micro-ondes, et noie son activité de paperasse chronophage. Il fait un boulot *utile*, en réparant mon micro-ondes ! Et pourtant, le système d'imposition lui rend la tâche difficile.

L'idée de « verdir le système fiscal », c'est de transférer les taxes qui portent sur ce qui est « utile », comme le travail, sur ce qui est « nuisible », comme les dommages à l'environnement. Les partisans d'une réforme fiscale favorable à l'environnement suggèrent d'équilibrer les baisses d'impôts sur ce qui est « utile » par des augmentations d'impôts équivalentes sur ce qui est « nuisible », de sorte que ces réformes fiscales soient neutres du point de vue des prélèvements réalisés.

La taxe carbone

La plus importante des taxes qu'il faudrait augmenter, si l'on veut promouvoir les technologies sans combustible fossile, c'est une taxe sur le carbone. Le prix du carbone doit être assez élevé pour promouvoir les investissements dans les alternatives aux combustibles fossiles et les mesures d'efficacité énergétique. Notez bien qu'il s'agit exactement de la même politique que celle qui était suggérée dans la section précédente. Donc, que notre motivation soit de régler le problème du changement climatique ou de sécuriser notre approvisionnement énergétique, la politique qui en résulte est la même : il nous faut un prix du carbone stable et élevé. La figure 29.2 indique de manière très grossière les prix du carbone requis pour entraîner différents changements de comportement et investissements ; ainsi que les prix, beaucoup plus bas, demandés par certaines organisations qui prétendent « compenser » les émissions de gaz à effet de serre. Quelle est la meilleure manière d'obtenir un prix du carbone élevé ? Le système communautaire d'échange de quotas d'émissions adopté par l'Europe (figure 29.1) est-il la voie à suivre ? La question est entre les mains des économistes et des experts des politiques internationales. L'avis des économistes Michael Grubb et David Newbery, de Cambridge, est que le

plan européen de permis d'émissions échangeables n'est pas à la hauteur de l'enjeu — « les instruments actuels ne permettront pas de fournir une réponse appropriée en termes d'investissements. »

The Economist recommande une taxe carbone comme mécanisme principal de soutien public aux sources d'énergie propres. Le *Quality of Life Policy Group* du parti conservateur recommande lui aussi des taxes environnementales plus importantes et la réduction d'autres taxes — « une transition de *qui gagne paie* vers *qui brûle paie*. » La commission royale sur la pollution environnementale dit également que le Royaume-Uni devrait introduire une taxe carbone. « Elle devrait s'appliquer en amont et couvrir tous les secteurs. »

Il y a donc un soutien très net en faveur d'une taxe carbone importante, accompagnée de baisses des taxes sur le travail, sur les entreprises, et sur la valeur ajoutée. Mais les taxes et les marchés, seuls, ne suffiront pas à provoquer toutes les actions nécessaires. L'approche taxes-et-marchés ne fonctionne pas si les consommateurs font de temps en temps des choix irrationnels, s'ils accordent plus de valeur à de l'argent à court terme plutôt qu'à des économies à long terme, ou si la personne qui décide des achats ne paie pas tous les coûts relatifs à ses choix.

De nombreuses marques sont, en effet, « *d'une cherté rassurante* ». Le choix du consommateur n'est pas seulement déterminé par le signal-prix. De nombreux consommateurs attachent plus d'importance à l'image qu'ils donnent d'eux-mêmes, et certains achètent délibérément plus cher.

Une fois qu'on a acheté quelque chose d'inefficace, il est trop tard. Il est essentiel que ce qui est inefficace ne soit même pas fabriqué ; ou bien que le consommateur, au moment d'acheter, se sente poussé à ne pas acheter quelque chose d'inefficace.

Voici quelques exemples supplémentaires d'échecs du libre marché.

Les barrières à l'entrée

Imaginez une taxe carbone assez élevée pour qu'un nouveau bidule super-sensass pauvre en carbone, l'Eco-bidule, coûte 5 % moins cher que son concurrent de longue date riche en carbone, le Dino-bidule, à condition d'être fabriqué dans les mêmes quantités. Grâce à d'astucieuses technologies, les émissions de carbone de l'Eco-bidule sont de 90 % inférieures — fantastique ! — à celles du Dino-bidule. Il serait clairement préférable pour la société que tout le monde se mette tout de suite à acheter des Eco-bidules. Mais pour le moment, les ventes du nouvel Eco-bidule se traînent, ce qui fait que ses coûts de production à l'unité sont plus élevés que ceux du Dino-bidule. Il n'y aura que quelques amoureux des arbres et autres blouses blanches pour acheter un Eco-bidule, et Eco-Bidules S.A. fera faillite.

Il est possible qu'une intervention du gouvernement soit nécessaire pour mettre de l'huile dans les rouages de la transition, et pour donner

sa chance à l'innovation. Soutenir la recherche et développement ? Une incitation fiscale pour avantager le nouveau produit (un peu comme les incitations fiscales qui ont facilité le passage de l'essence plombée à l'essence sans plomb) ?

Le problème des petites différences de coût

Imaginez qu'Eco-Bidules S.A. fabrique tout de A à Z et que les taxes carbone soient suffisamment élevées pour qu'un Eco-bidule coûte effectivement 5 % moins cher que son concurrent de longue date et riche en carbone de chez Dino-Machines et Cie. Cette fois, les taxes carbone font faire leur office, et tous les consommateurs vont acheter le bidule pauvre en carbone, non ? Que nenni ! Tout d'abord, beaucoup de consommateurs ne font pas vraiment attention à une différence de prix de 5 %. L'image, ça fait tout. Ensuite, dès qu'elle va se sentir menacée par l'Eco-bidule, Dino-Machines et Cie va relancer son Dino-bidule, en insistant sur le fait qu'il est plus patriotique, qu'il est désormais disponible en vert, et en montrant des gens cool qui restent fidèles au Dino-bidule. « Les vrais hommes achètent des Dino-bidules. » Si ça ne suffit pas, Dino-Machines fera publier des communiqués de presse dans lesquelles on lit que les scientifiques n'ont pas encore écarté la possibilité que l'utilisation pendant de longues périodes d'un Eco-bidule puisse provoquer des cancers, mettant en avant le cas d'une vieille dame qui s'est cassé le col du fémur en trébuchant sur un Eco-bidule ou suggérant que l'Eco-bidule pourrait être nuisible aux pipistrelles pygmées. Peur. Incertitudes. Doute. Et comme plan de secours, Dino-Machines peut toujours racheter la société Eco-Bidules. Le produit qui gagne n'aura rien à voir avec les économies d'énergie, si l'incitation économique auprès du consommateur n'est que de 5 %.

Comment résoudre ce problème ? Peut-être le gouvernement devrait-il simplement interdire la vente du Dino-bidule (exactement comme il a interdit les ventes des voitures consommant de l'essence plombée) ?

Le problème de Charles et Josy

Imaginez que Charles le propriétaire loue un appartement à Josy la locataire. Charles est responsable de l'entretien de l'appartement et fournit les appareils ménagers. Josy, de son côté, paie tous les mois les factures de chauffage et d'électricité. Voici le problème : Charles n'est aucunement incité à investir pour faire des travaux dans l'appartement qui permettraient de réduire les factures de Josy. Il pourrait installer des ampoules électriques plus efficaces, un réfrigérateur plus économe ; le prix à l'achat plus élevé de ces appareils plus respectueux de l'environnement serait facilement compensé par leur consommation moindre sur leur durée de vie. Mais c'est Josy qui en bénéficierait, pas Charles. De la même manière, Charles est peu incité à améliorer l'isolation de l'appartement ou à instal-

ler du double-vitrage, en particulier s'il tient compte du risque que Manu, le copain de Josy, pourrait casser une fenêtre un soir où il a trop bu. En principe, dans un marché parfait, Charles et Josy prendraient les « bonnes » décisions : Charles installerait tous les éléments pour économiser l'énergie, et il ferait payer à Josy un loyer mensuel un petit peu plus élevé ; Josy reconnaîtrait que vivre dans un appartement moderne et bien aménagé coûte nettement moins cher, et elle accepterait volontiers de payer le loyer plus élevé ; Charles demanderait une caution plus élevée pour couvrir le risque de casse des nouvelles fenêtres qui lui ont coûté plus cher ; et Josy répondrait de manière rationnelle en virant Manu. Cependant, je ne suis pas sûr que Charles et Josy puissent jamais aboutir à un marché parfait. Josy ne roule pas sur l'or ; elle a du mal à payer une caution élevée. Charles, lui, souhaite ardemment louer son appartement, donc Josy ne lui fait pas confiance lorsqu'il lui promet des factures énergétiques réduites — elle le soupçonne d'exagérer.

Il faut donc une intervention extérieure sous une forme ou une autre pour que Charles et Josy fassent les bons choix — par exemple, le gouvernement pourrait légiférer et imposer une lourde taxe sur les appareils ménagers inefficaces ; il pourrait interdire de vente les réfrigérateurs qui ne respectent pas les standards d'efficacité énergétique ; il pourrait imposer que tous les appartements respectent des normes très strictes d'isolation thermique ; ou il pourrait introduire un système d'évaluation indépendante et obligatoire des appartements, de sorte que Josy puisse consulter un diagnostic énergétique fiable de l'appartement avant de le louer.

Investir dans la recherche et le développement

Nous déplorons les montants extrêmement faibles que le gouvernement a consacré à la recherche et développement sur les énergies renouvelables (15 millions d'euros en 2002–2003) [...] Si l'on veut exploiter les ressources autres que l'éolien au Royaume-Uni, il va falloir changer cela. Nous ne pouvons pas écarter la conclusion selon laquelle le gouvernement ne prend pas les problèmes énergétiques suffisamment au sérieux.

Comité sur les Sciences et la Technologie de la Chambre des Lords

L'absence de compréhension scientifique mène souvent à des prises de décision superficielles. Le livre blanc sur l'énergie de 2003 en a été un bon exemple. En public, je n'irais pas le qualifier de travail d'amateur, mais il ne s'est pas saisi du problème de manière réaliste.

Sir David King, ancien conseiller scientifique en chef du gouvernement britannique

En participant au bureau consultatif sur les énergies renouvelables créé par le gouvernement [...] j'ai eu l'impression de regarder plu-

sieurs dizaines d'épisodes de Oui, Monsieur le Ministre au ralenti. Je ne crois pas que ce gouvernement ait jamais pris les énergies renouvelables au sérieux.

Jeremy Leggett, fondateur de Solarcentury

Action simple	Économie possible
Mettez un pull et baissez le thermostat de votre chauffage (disons jusqu'à 15 ou 17 °C). Installez des thermostats individuels sur tous les radiateurs. Assurez-vous que le chauffage est arrêté quand personne n'est à la maison. Faites la même chose au travail.	20 kWh/j
Regardez vos compteurs (gaz, électricité, eau) chaque semaine, et identifiez les changements faciles pour réduire votre consommation (par exemple, éteindre certains appareils). Faites un concours de réduction avec des amis. Relevez aussi les compteurs à votre lieu de travail, pour faire un audit énergétique en continu	4 kWh/j
Ne prenez plus l'avion..	35 kWh/j
Conduisez moins, conduisez moins vite, conduisez plus sagement, faites du covoiturage, utilisez une voiture électrique, rejoignez un club automobile, faites du vélo, marchez, prenez le train et le bus.	20 kWh/j
Continuez à utiliser vos vieux gadgets (par exemple, votre ordinateur) ; ne les remplacez pas rapidement.	4 kWh/j
Remplacez vos ampoules électriques par des ampoules basse-consommation ou à LED.	4 kWh/j
N'achetez pas tout ce fatras. Évitez les emballages.	20 kWh/j
Mangez végétarien, six jours par semaine.	10 kWh/j

TABLEAU 29.3. Huit actions individuelles simples.

Il me semble que les chiffres parlent pour eux-mêmes. Regardez simplement la figure 28.5 (page 258) et faites la comparaison entre, d'une part, les milliards dépensés pour rénover les bureaux et pour s'occuper des joujoux des militaires, et, d'autre part, l'engagement 100 fois plus petit pour la recherche et le développement relatifs aux énergies renouvelables. Il faut des décennies pour développer des technologies renouvelables comme l'énergie marémotrice, le solaire à concentration ou le photovoltaïque. La fusion

nucléaire prendra aussi des décennies. Toutes ces technologies ont besoin d'un soutien franc et massif si l'on veut qu'elles soient couronnées de succès.

Agir au niveau individuel

Les gens me demandent parfois « qu'est-ce qu'il faudrait que, *moi*, je fasse, à mon niveau ? » Le tableau 29.3 indique huit actions individuelles assez simples que je pourrais recommander, et, pour chacune d'entre elles, il donne une indication *très* grossière des économies associées. Recommandations sans garantie, vous reconnaissez avoir lu et accepté nos conditions générales avant de les appliquer. Les économies que vous réaliserez dépendront de votre point de départ. Les chiffres dans le tableau 29.3 supposent que l'on part de la situation d'un consommateur plus gourmand que la moyenne.

Si les actions ci-dessus sont faciles à mettre en place, celles du tableau 29.4 requièrent un peu plus de planification, d'obstination et d'argent.

Action majeure	Économie possible
Éliminez les courants d'air.	5 kWh/j
Installez du double vitrage.	10 kWh/j
Améliorez l'isolation des murs, du toit et du plancher.	10 kWh/j
Installez des panneaux solaires thermiques pour l'eau chaude.	8 kWh/j
Installez des panneaux photovoltaïques.	5 kWh/j
Démolissez un vieux bâtiment et remplacez-le par un nouveau.	35 kWh/j
Remplacez votre chauffage brûlant des combustibles fossiles par des pompes à chaleur (géothermiques, air-air ou air-eau).	10 kWh/j

TABLEAU 29.4. Sept actions plus difficiles à mettre en place.

Enfin, le tableau 29.5 montre quelques outsiders : des actions simples permettant de petites économies.

Action	Économie possible
Lavez votre linge à l'eau froide.	0,5 kWh/j
Renoncez au sèche-linge ; utilisez une corde à linge ou un placard-séchoir.	0,5 kWh/j

TABLEAU 29.5. Quelques actions supplémentaires permettant de petites économies.

Notes et bibliographie

Page n°

- 263 « [...] *assez malaisé en pratique* [...] » La transcription intégrale en anglais de l'entretien avec Tony Blair (9 janvier 2007) est accessible ici : [2ykfgw]. En voici quelques extraits :
- « **Journaliste** : Avez-vous envisagé de, peut-être, ne pas prendre l'avion pour aller passer vos vacances à la Barbade, et de ne pas parcourir tous ces kilomètres dans les airs ?
- Tony Blair** : Pour être franc, j'aurais quelques réticences à renoncer à mes vacances à l'étranger.
- Journaliste** : Mais cela enverrait un message clair, n'est-ce pas, si on ne voyait pas ce long voyage aérien vers le soleil [...] — des vacances plus près de chez vous ?
- Tony Blair** : Oui — mais pour ma part, je crois que tout ceci est assez malaisé en pratique, et qu'on ne peut pas attendre ça des gens. Je crois que ce que nous devons faire, c'est chercher comment rendre les voyages aériens plus économes en énergie, et développer de nouveaux carburants pour consommer moins d'énergie et émettre moins de CO₂. Comment — par exemple — avec les nouvelles structures d'avions, ils sont beaucoup plus efficaces en énergie. Je sais que tout le monde se dit toujours — les gens se disent probablement que le Premier ministre ne devrait pas partir en vacances du tout. Mais je crois que dans ce domaine, si on fixe des objectifs irréalistes aux gens, vous savez, si on leur dit qu'on va abandonner le transport aérien bon marché... Vous savez, j'attends toujours le premier homme politique espérant vraiment gagner les élections, qui oserait dire ce genre de choses — mais personne ne le fait. »
- L'autre citation : « Si nous n'agissons pas maintenant — pas dans un futur proche, mais maintenant — ces conséquences si désastreuses seront alors irréversibles. Il n'y a donc rien qui soit plus sérieux, plus urgent ou qui exige plus que l'on montre l'exemple », est un extrait du discours de Tony Blair au moment où le rapport Stern a été publié, le 30 octobre 2006 [2nsvx2]. Lire aussi [yxq5xk] pour plus de commentaires.
- 267 *Réforme des impôts pour l'environnement*. Voir la commission fiscale verte, www.greenfiscalcommission.org.uk.
- *L'objectif est de taxer plus les pollutions [...] et de taxer moins le travail*. Discours à l'occasion de la restitution des conclusions du Grenelle de l'environnement, 25 octobre 2007. [3tcpyah]
- 268 *The Economist recommande une taxe carbone*. "Nuclear power's new age," [Le nouvel âge de l'énergie nucléaire], *The Economist*, 8 septembre 2007.
- *Le Quality of Life Policy Group du parti conservateur*. — Gummer et al. (2007).

30 Programmes énergétiques pour l'Europe, l'Amérique et le monde

La figure 30.1 montre la consommation de puissance de très nombreux pays ou régions du monde, comparée à leur produit national brut (PNB). Une supposition très fréquente est que le développement humain et la croissance sont de bonnes choses. En esquisant des plans énergétiques durables pour le monde entier, je vais faire l'hypothèse que tous les pays qui ont un faible PNB par habitant vont progresser vers la droite dans la figure 30.1, et qu'avec l'augmentation de leur PNB, leur consommation de puissance va, elle aussi, inévitablement augmenter. Le plan de consommation qu'il nous faut établir n'est pas très clair, mais partir du niveau de consommation d'un Européen moyen (125 kWh par jour et par personne) me semble une hypothèse raisonnable. On pourrait aussi supposer que des mesures d'efficacité comparables à celles envisagées pour la Grande-Bretagne schématique des chapitres 19 à 28 puissent permettre à tous les pays d'atteindre un niveau de vie européen avec une consommation de puissance plus faible. Dans le plan de la consommation de la page 241, la consommation de la Grande-Bretagne schématique tombe à

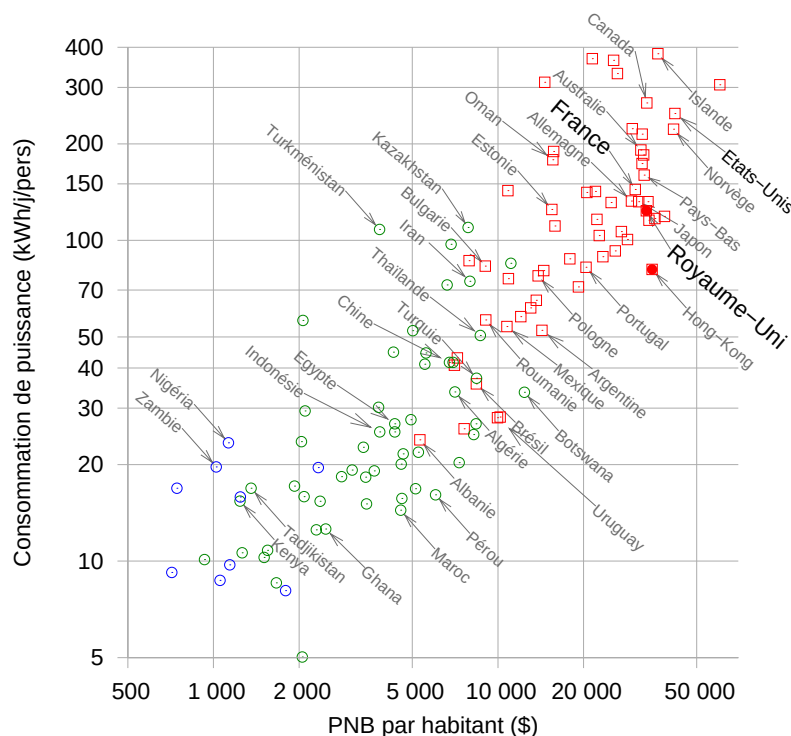


FIGURE 30.1. Consommation de puissance par habitant comparée au PNB par habitant, en dollars US en parité de pouvoir d'achat. Les données proviennent du rapport 2007 sur le développement humain du PNUD. Les carrés montrent les pays ayant un niveau de développement humain « élevé » ; les cercles montrent les pays ayant un niveau de développement humain « moyen » ou « faible ». Les deux variables sont représentées dans une échelle logarithmique. La figure 18.4 montre les mêmes données avec une échelle linéaire.

environ **68 kWh/j par personne**. En gardant à l'esprit que notre Grande-Bretagne schématique ne possède que peu d'activités industrielles, il serait sans doute raisonnable de prendre comme hypothèse une consommation cible un peu plus élevée, comme celle de Hong-Kong (**80 kWh/j par personne**).

Refaire les calculs pour l'Europe

Est-ce que l'Europe peut vivre juste sur des renouvelables ?

La densité de population moyenne en Europe est en gros deux fois faible que celle de la Grande-Bretagne. On y trouve donc plus de surfaces de terres dans lesquelles installer d'énormes installations d'énergie renouvelable. La superficie de l'Union européenne est en gros de **9 000 m² par personne**. Cependant, bon nombre des sources d'énergie renouvelable ont une densité de puissance plus faible en Europe qu'en Grande-Bretagne : sur l'essentiel du continent européen, il y a moins de vent, moins de vagues et moins de marées. Certaines régions ont plus de possibilités hydroélectriques (en Scandinavie et en Europe centrale), et certaines reçoivent plus de soleil. Voyons maintenant quelques chiffres approximatifs.

Vent

Au cœur du continent européen, les vitesses de vent typiques sont plus faibles que sur les îles Britanniques — sur l'essentiel de l'Italie, par exemple, les vitesses de vent sont inférieures à 4 m/s. Faisons l'hypothèse qu'un cinquième de l'Europe dispose de vitesses de vent suffisantes pour atteindre une densité de puissance de 2 W/m² et pour que des fermes éoliennes soient économiquement rentables. Supposons également que l'on prescrive à ces régions la même ordonnance qu'à la Grande-Bretagne dans le chapitre 4, en couvrant 10 % de leur surface de fermes éoliennes. Puisque la superficie de l'Union européenne est environ 9 000 m² par personne, le vent permet de fournir :

$$\frac{1}{5} \times 10 \% \times 9\,000 \text{ m}^2 \times 2 \text{ W/m}^2 = 360 \text{ W}$$

soit **9 kWh/j par personne**.

Hydroélectrique

La production hydroélectrique cumulée en Europe atteint 590 TWh/an, ou 67 GW. Partagée entre 500 millions d'habitants, cela fait 3,2 kWh/j par personne. Cette production est dominée par la Norvège, la France, la Suède, l'Italie, l'Autriche et la Suisse. Si chaque pays doublait la taille de son parc d'installations hydroélectriques — ce qui serait, à mon avis, difficile — alors l'hydroélectricité pourrait fournir **6,4 kWh/j par personne**.

Vagues

Si on prend tout le littoral atlantique (environ 4 000 km) et si on le multiplie par un rythme de production moyenne supposé être égal à 10 kW/m, alors on obtient **2 kWh/j par personne**. Les littoraux baltiques et méditerranéens ne disposent d'aucune ressource de vagues de houle qui soit intéressante.

Marées

Si on double la ressource totale estimée autour des îles Britanniques (11 kWh/j par personne, cf. chapitre 14) pour prendre en compte l'exploitation des ressources marémotrices de France, d'Irlande et de Norvège, et qu'on la partage entre 500 millions d'Européens, on obtient **2,6 kWh/j par personne**. Les littoraux baltiques et méditerranéens ne disposent d'aucune ressource marémotrice qui soit intéressante.

Photovoltaïque et solaire thermique de toit

La plupart des régions du continent européen sont plus ensoleillées que le Royaume-Uni. Des panneaux solaires y fourniraient donc plus de puissance. 10 m² de panneaux photovoltaïques installés sur le toit fourniraient environ **7 kWh/j** dans toutes les régions situées plus au sud que la Grande-Bretagne. De même, 2 m² de panneaux solaires thermiques pourraient fournir en moyenne **3,6 kWh/j** de chaleur de basse qualité. (Je ne vois pas beaucoup d'intérêt à avoir plus de 2 m² de panneaux solaires thermiques par personne, puisqu'une telle capacité serait déjà suffisante pour répondre entièrement à la demande habituelle d'eau chaude.)

Quoi d'autre ?

Le total atteint jusque-là est de $9 + 6,4 + 2 + 2,6 + 7 + 3,6 = 30,6$ kWh/j par personne. Les seules ressources que nous n'avons pas encore mentionnées sont la géothermie et les parcs solaires de grande taille (que ce soit avec des miroirs, des panneaux ou de la biomasse).

La géothermie pourrait faire l'affaire, mais elle en est toujours au stade de la recherche. Je suggère de la considérer comme la fusion nucléaire : un bon investissement, mais pas un investissement sur lequel il faut se reposer.

Et les parcs solaires ? On pourrait imaginer utiliser 5 % de la surface de l'Europe (soit 450 m² par personne) pour installer des parcs photovoltaïques comme celle de la figure 6.7 en Bavière (qui a une densité de puissance de 5 W/m²). Ce qui permettrait de fournir une puissance moyenne de :

$$5 \text{ W/m}^2 \times 450 \text{ m}^2 = 54 \text{ kWh/j par personne.}$$



FIGURE 30.2. Un chauffe-eau solaire fournissant de l'eau chaude à une famille du Michigan. La pompe du système est alimentée par le petit panneau photovoltaïque à gauche.

Par conséquent, des parcs photovoltaïques de grande taille pourraient ajouter une quantité substantielle à notre compte. Mais le problème principal des panneaux photovoltaïques, c'est leur coût. Et obtenir de la puissance en hiver, c'est aussi un problème !

Les cultures énergétiques ? Les plantes ne capturent que $0,5 \text{ W/m}^2$ (figure 6.12). Étant donné que l'Europe a besoin de se nourrir, la contribution de la puissance non alimentaire à partir de plantes en Europe ne pourra jamais être énorme. Certes, il y a bien un peu de colza cultivé pour son huile ici, et un peu de forêts là, mais je ne vois pas comment la contribution non alimentaire totale des plantes pourrait dépasser **12 kWh/j par personne**.

Conclusion

Soyons réalistes. Tout comme la Grande-Bretagne, *l'Europe ne peut pas vivre en se reposant uniquement sur ses propres ressources d'énergie renouvelable*. Alors si le but est de se débarrasser des combustibles fossiles, l'Europe a besoin du nucléaire ou du solaire importé de déserts d'autres pays (comme décrit en page 211), voire des deux.

Refaire les calculs pour l'Amérique du Nord

L'Américain moyen consomme 250 kWh/j par personne. Cet objectif est-il atteignable avec juste des renouvelables ? Et si on imaginait d'imposer des mesures de d'efficacité énergétique de choc (comme des voitures plus économes et des trains électriques à grande vitesse), de telle sorte que les Américains en soient réduits au misérable niveau de vie d'à peine 125 kWh/j qu'un citoyen européen ou japonais typique doit supporter ?

Vent

Une étude d'Elliott et al. (1991) a fait une évaluation du potentiel éolien aux États-Unis. Les sites les plus ventés se trouvent dans le Dakota du Nord, au Wyoming et dans le Montana. Ils ont calculé que, sur l'ensemble des États-Unis, $435\,000 \text{ km}^2$ de terres avec du vent pourraient être exploitées sans hérisser trop de gens, et que la quantité d'électricité produite pourrait être de $4\,600 \text{ TWh}$ par an, ce qui fait **42 kWh par jour et par personne** si on la partage entre 300 millions de personnes. Soit dit en passant, leurs calculs font l'hypothèse d'une densité de puissance moyenne de $1,2 \text{ W/m}^2$ — c'est-à-dire moins que les 2 W/m^2 que nous avons supposés dans le chapitre 4. La superficie de ces fermes éoliennes, $435\,000 \text{ km}^2$, est à peu près la même que celle de la Californie. La capacité cumulée des aérogénérateurs qu'il faudrait installer (en supposant un facteur de charge de 20 %) serait d'environ $2\,600 \text{ GW}$, ce qui correspond à une multiplication par 200 du parc éolien actuellement installé aux États-Unis.

Vent en mer

Si on suppose qu'une superficie d'eaux marines de faible profondeur égale à celle du Delaware et du Connecticut réunis (20 000 km², soit une partie substantielle de toutes les eaux marines de faible profondeur présentes sur la côte est des États-Unis) sont recouvertes de fermes éoliennes offshore avec une densité de puissance de 3 W/m², on obtient une puissance moyenne de 60 GW. Ce qui fait **4,8 kWh par jour et par personne** si on les partage entre 300 millions de personnes. La capacité des aérogénérateurs qu'il faudrait installer correspondrait à une multiplication par 15 du parc éolien actuellement installé aux États-Unis.

Géothermie

J'ai mentionné une étude du MIT sur l'énergie géothermique (Massachusetts Institute of Technology, 2006) dans le chapitre 16. Les auteurs sont optimistes quant au potentiel de l'énergie géothermique en Amérique du Nord, en particulier dans les États de l'ouest où se trouvent plus de roches chaudes fracturables. « Avec un investissement en R&D raisonnable, des systèmes géothermiques stimulés pourraient fournir 100 GW(e) voire plus, de capacité de production pour les 50 prochaines années à un coût compétitif. De plus, des systèmes géothermiques stimulés constitueraient une source de puissance sûre à long terme. » Supposons qu'ils ne se trompent pas. 100 GW d'électricité, cela fait **8 kWh par jour et par personne** si on les partage entre 300 millions de personnes.

Hydroélectricité

Les installations hydroélectriques du Canada, des États-Unis, et du Mexique génèrent environ 660 TWh par an. Partagés entre 500 millions de personnes, cela fait 3,6 kWh/j par personne. Est-il possible de multiplier par deux la production hydroélectrique nord-américaine ? Si c'était le cas, l'hydroélectricité pourrait fournir **7,2 kWh/j par personne**.

Quoi d'autre ?

Au total, on atteint jusque-là $42 + 4,8 + 8 + 7,2 = 62$ kWh/j par personne. Cela ne suffit même pas à assurer une existence européenne ! Je pourrais débattre de nombreuses autres possibilités, comme la combustion durable des forêts canadiennes dans les centrales électriques. Mais plutôt que de prolonger une lente agonie, passons directement à une technologie qui compte vraiment : le solaire à concentration.

La figure 30.3 montre la superficie d'Amérique du nord qui pourrait fournir à tout un chacun sur place (500 millions de personnes) une puissance moyenne de **250 kWh/j**.

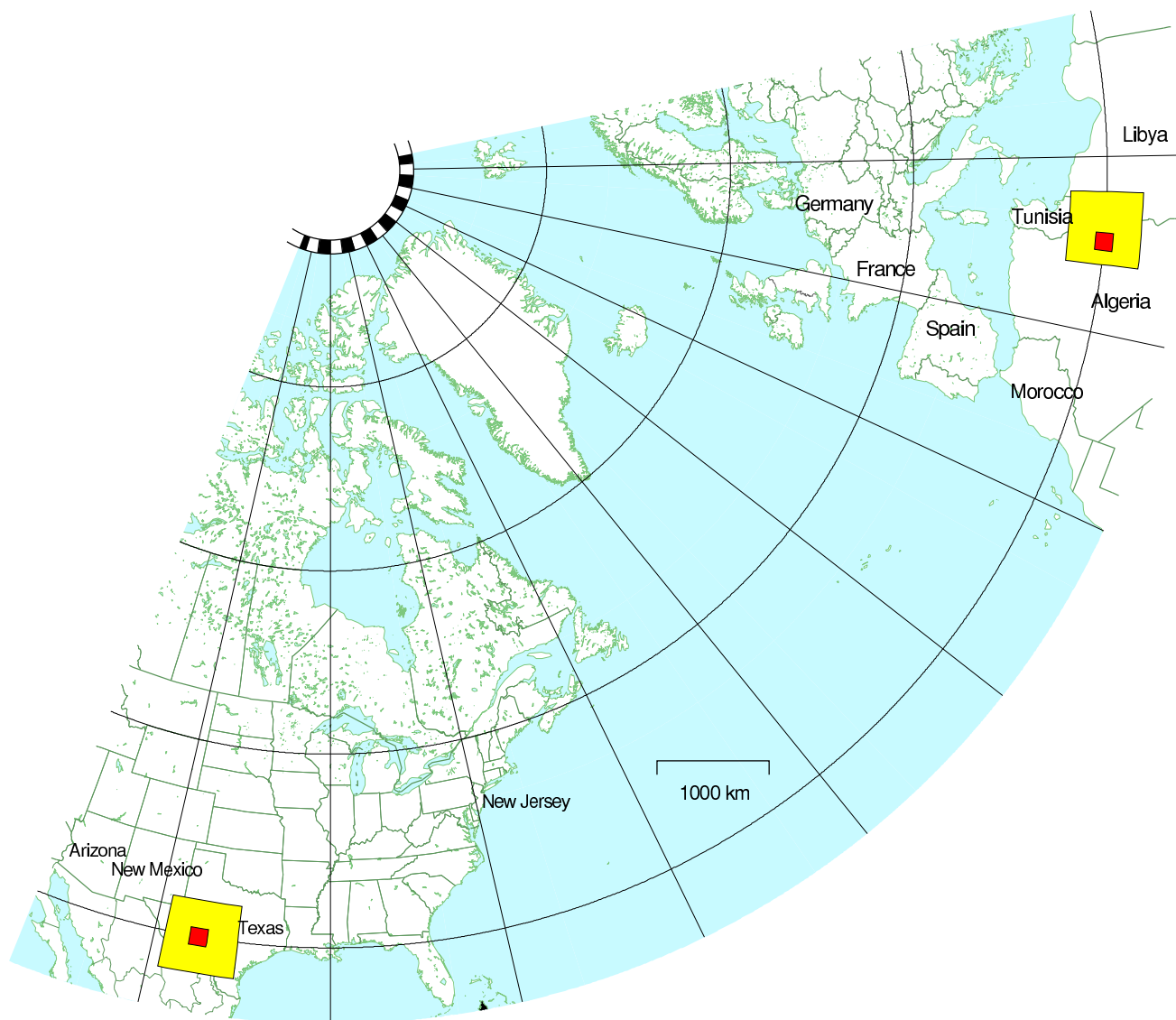


FIGURE 30.3. Le petit carré jaune a encore frappé. Un tel carré de 600 km sur 600 km en Amérique du Nord, complètement couvert d'installations solaires à concentration, fournirait assez de puissance pour permettre à 500 millions de personnes d'avoir la consommation moyenne de puissance d'un Américain, c'est-à-dire 250 kWh/j.

Cette carte montre également le carré jaune de 600 km sur 600 km en Afrique que nous avons vu précédemment. J'ai fait l'hypothèse d'une densité de puissance de 15 W/m^2 , comme précédemment.

A titre de comparaison, un carré jaune a la même superficie que l'Allemagne, ou bien recouvre les deux tiers du territoire français. Pour ceux qui préfèrent la traduction en américain, il a une superficie un peu plus importante que celle de l'Arizona, et 16 fois la taille du New Jersey. Dans chacun de ces grands carrés, il y a un petit carré de 145 km sur 145 km montrant la surface de désert requise (aussi grande que le New Jersey) pour fournir 250 kWh par jour et par personne à 30 millions de personnes.

Conclusion

Hormis le solaire, les renouvelables en Amérique du Nord ne suffisent pas à faire vivre la population de ce continent. Mais si on y ajoute un développement massif du solaire, alors il y en a assez. Par conséquent, l'Amérique du nord a besoin soit de solaire dans ses propres déserts, soit du nucléaire, soit des deux.

Refaire les calculs pour le monde entier

Comment 6 milliards de personnes peuvent-elles obtenir la puissance nécessaire pour assurer un niveau de vie de type européen — disons, 80 kWh par jour et par personne, par exemple ?

Vent

Les sites exceptionnels dans le monde, avec des vents forts et réguliers, sont les États du centre des États-Unis (Kansas, Oklahoma), le Saskatchewan au Canada, les extrémités sud de l'Argentine et du Chili, le nord-est de l'Australie, le nord-est et le nord-ouest de la Chine, le nord-ouest du Soudan, le sud-ouest de l'Afrique du Sud, la Somalie, l'Iran, et l'Afghanistan. Ainsi que tous les sites en mer au-delà de 30 degrés de latitude nord et sud.

Pour notre estimation planétaire, reprenons les chiffres que donnent Greenpeace et de l'Association européenne pour l'éolien : « les ressources éoliennes totales disponibles à l'échelle mondiale sont estimées à 53 000 TWh par an ». Cela fait **24 kWh/j par personne**.

Hydroélectricité

A l'échelle mondiale, l'hydroélectricité contribue actuellement pour environ 1,4 kWh/j par personne.

D'après le site www.ieahydro.org, « l'association internationale pour l'hydroélectricité et l'Agence internationale de l'énergie estiment le potentiel hydroélectrique techniquement exploitable total à 14 000 TWh par an [soit 6,4 kWh/j par personne dans le monde], dont environ 8 000 TWh par an [soit **3,6 kWh/j par personne**] sont actuellement considérés comme économiquement rentables. L'essentiel du potentiel de développement se trouve en Afrique, en Asie et en Amérique latine. »

Marées

Il y a plusieurs sites dans le monde disposant de ressources marémotrices de même échelle que l'estuaire de la Severn (figure 14.8). En Argentine, il existe deux sites : San José et le Golfo Nuevo. L'Australie possède le Walcott Inlet. Les États-Unis et le Canada se partagent la baie de Fundy, le

Canada a la Baie Cobéquid. L'Inde a le Golfe de Khambat. Les États-Unis ont le Turnagain Arm et le Knik Arm, en Alaska, et la Russie a Tugur, sur la mer d'Okhotsk.

Ensuite, il y a le site le plus énorme du monde, en Russie, nommé Penzhinsk, avec une ressource de 22 GW — dix fois grand comme la Severn !

Kowalik (2004) estime que dans le monde entier, 40 à 80 GW de puissance marémotrice pourraient être générés. Partagés entre 6 milliards de personnes, cela représente **de 0,16 à 0,32 kWh/j par personne**.

Vagues

On peut estimer la puissance totale extractible de la houle en multipliant la longueur des côtes exposées (environ 300 000 km) par la puissance typique par unité de longueur de côtes (10 kW par mètre) : la puissance brute est donc d'environ 3 000 GW.

En supposant que 10 % de cette puissance brute soit interceptée par des systèmes convertissant la puissance mécanique en puissance électrique avec un rendement de 50 %, les vagues de houle pourraient fournir **0,5 kWh/j par personne**.

Géothermie

Selon D. H. Freeston, de l'Institut géothermique d'Auckland, la puissance géothermique s'élevait en moyenne à environ 4 GW à l'échelle mondiale en 1995 — soit 0,01 kWh/j par personne.

Si on suppose que les auteurs du MIT mentionnés page 278 ne se sont pas trompés, et si on suppose que le monde entier est comparable à l'Amérique, alors la puissance géothermique offre **8 kWh/j par personne**.

Solaire pour les cultures énergétiques

Les gens deviennent tous très enthousiastes dès qu'on parle des cultures énergétiques comme le jatropha, qui, d'après ce qu'on dit, n'entrerait pas en concurrence avec la nourriture pour ses surfaces cultivées, parce qu'on peut le faire pousser dans les zones désertiques. Les gens devraient regarder les chiffres avant de s'emballer. Ceux concernant le jatropha se trouvent en page 335. Même si toute l'Afrique était complètement recouverte de champs de jatropha, la puissance produite, partagée entre 6 milliards de personnes, serait de **8 kWh/j par personne** (soit seulement un tiers de la consommation mondiale de pétrole actuelle). Vous n'arriverez pas à résoudre le problème de votre addiction au pétrole en passant au jatropha !

Faisons une estimation de la limite théorique de la puissance que des cultures énergétiques pourraient fournir au monde entier, en utilisant la même méthode que celle que nous avons appliquée pour la Grande-Bretagne dans le chapitre 6 : imaginons qu'on prenne toutes les terres arables

ou cultivées, et qu'on les consacre à des cultures énergétiques — 18 % des terres de la planète sont actuellement des terres arables ou cultivées, ce qui fait une superficie de 27 millions de km², ou encore 4 500 m² par personne si on les partage entre 6 milliards d'individus. En faisant l'hypothèse d'une densité de puissance de 0,5 W/m² et de 33 % de pertes durant les processus agricoles et industriels, on trouve que les cultures énergétiques occupant l'intégralité des terres agricoles pourraient fournir 36 kWh/j par personne. Maintenant, c'est peut-être une sous-estimation, puisque nous avons vu dans la figure 6.12 (page 52) que la canne à sucre brésilienne pouvait fournir une densité de puissance de 1,6 W/m², c'est-à-dire trois fois plus que ce que je viens de supposer. Bon, d'accord, au Brésil, les cultures énergétiques ont donc peut-être un certain avenir. Mais j'aimerais passer à la dernière possibilité.

Chauffage solaire, photovoltaïque, et solaire à concentration

Les chauffe-eau solaires sont une évidence. Ils peuvent fonctionner presque partout dans le monde. La Chine est un leader mondial de cette technologie. Il y a plus de 100 GW de capacité de chauffe-eau solaires installée dans le monde entier, et plus de la moitié se trouve en Chine.

Le photovoltaïque est techniquement faisable en Europe, mais je l'ai jugé trop cher. J'espère avoir tort, évidemment. Ce serait vraiment super si le coût de la puissance photovoltaïque baissait de la même manière que celui de la puissance informatique durant ces quarante dernières années.

A mon avis, dans de nombreuses régions, la meilleure technologie solaire pour produire de l'électricité sera le solaire à concentration, dont nous avons parlé pages 210 et 279. Dans ces pages, nous avons déjà établi que le niveau de vie d'un milliard de personnes en Europe et en Afrique du nord pourrait être soutenu par des installations solaires à concentration de la taille d'un pays entier, et placées dans des déserts proches de la Méditerranée; et que le niveau de vie d'un demi-milliard d'habitants en Amérique du nord pourrait être soutenu par des installations aussi grandes que l'Arizona, placées dans des déserts des États-Unis et du Mexique. A titre d'exercice, je laisse au lecteur le soin de trouver les déserts les plus appropriés pour soutenir un niveau de vie comparable pour les 4,5 autres milliards d'individus dans le monde.

Conclusion

Hormis le solaire, les chiffres sont les suivants : éolien : 24 kWh/j/pers ; hydroélectrique : 3,6 kWh/j/pers ; marées : 0,3 kWh/j/pers ; vagues : 0,5 kWh/j/pers ; géothermie : 8 kWh/j/pers — soit un total de 36 kWh/j/pers. Notre cible était celle d'une consommation post-européenne de 80 kWh/j par personne. Notre conclusion est donc claire : à part le solaire, les renouvelables sont peut-être « énormes », mais ils ne le sont

Sheffield	28 %
Edimbourg	30 %
Manchester	31 %
Cork	32 %
Londres	34 %
Cologne	35 %
Copenhague	38 %
Munich	38 %
Paris	39 %
Berlin	42 %
Wellington (N.-Zélande)	43 %
Seattle	46 %
Toronto	46 %
Detroit	54 %
Winnipeg	55 %
Pékin	55 %
Sydney	56 %
Pula (Croatie)	57 %
Nice	58 %
Boston	58 %
Bangkok (Thaïlande)	60 %
Chicago	60 %
New York	61 %
Lisbonne	61 %
Kingston (Jamaïque)	62 %
San Antonio (États-Unis)	62 %
Séville (Espagne)	66 %
Nairobi (Kenya)	68 %
Johannesburg	71 %
Tel Aviv	74 %
Los Angeles	77 %
Uppington (Afrique du s.)	91 %
Yuma (États-Unis)	93 %
Désert du Sahara	98 %

TABLEAU 30.4. Chiffres d'ensoleillement dans le monde.
[3doæg]

pas assez. Pour compléter un plan dont le compte soit bon, il faut nous reposer sur une ou plusieurs formes d'énergie solaire. Ou bien utiliser le nucléaire. Ou les deux.

Notes et bibliographie

Page n°

278 *Ressources éoliennes en mer en Amérique du nord.*

www.ocean.udel.edu/windpower/ResourceMap/index-wn-dp.html

280 *L'Amérique du nord a besoin soit de solaire dans ses déserts, soit du nucléaire, soit des deux.* Pour lire le plan de Google de 2008 pour une défossilisation à 40 % des États-Unis, voir l'article de Jeffery Greenblatt intitulé *Clean Energy 2030* [31cw9c]. Les principaux éléments de ce plan sont des mesures pour une meilleure efficacité énergétique, l'électrification des transports et la production d'électricité à partir d'énergies renouvelables. Leur plan de production d'électricité inclut :

10,6 kWh/j/pers.	d'éolien,
2,7 kWh/j/pers.	de photovoltaïque,
1,9 kWh/j/pers.	de solaire à concentration,
1,7 kWh/j/pers.	de biomasse,
et 5,8 kWh/j/pers.	de géothermie

d'ici à 2030. Cela fait un total de 23 kWh/j/pers. de nouveaux renouvelables. Ils supposent aussi une légère augmentation de l'énergie nucléaire, qui passe de 7,2 kWh/j/pers. à 8,3 kWh/j/pers., et aucun changement dans la production hydroélectrique. Le gaz naturel continuerait à être utilisé, contribuant à hauteur de 4 kWh/j/pers.

280 *Le potentiel hydroélectrique total à l'échelle mondiale...*

Source : www.ieahydro.org/faq.htm.

281 *La ressource mondiale de puissance de la houle près des côtes est estimée à 3 000 GW.* Voir Quayle et Changery (1981).

– *La puissance géothermique à l'échelle mondiale en 1995.* Freeston (1996).

282 *Cultures énergétiques.* Voir Rogner (2000) pour des estimations similaires à la mienne.

Pour en savoir plus : La revue *Nature* a publié un article de 8 pages décrivant comment fournir de la puissance au monde entier (Schiermeier et al., 2008).

31 La dernière chose dont il faut parler

La capture du dioxyde de carbone à partir de l'air ambiant est la dernière chose dont nous devons parler.

J'utilise ici délibérément une phrase à double sens. D'une part, il faut tellement d'énergie pour capturer le carbone à partir de l'air ambiant qu'il semble presque absurde d'en parler (et l'on peut craindre que la perspective d'une solution de ce genre au changement climatique favorise l'inaction aujourd'hui). Mais par ailleurs, je pense aussi que nous devons sérieusement aborder le sujet de la capture du CO₂, réfléchir à la meilleure façon d'y parvenir, et financer la recherche afin d'améliorer les procédés de capture. En effet, la capture de carbone de l'atmosphère pourrait s'avérer être notre dernier recours si le changement climatique tournait aussi mal que nous le prédisent les climatologues, et si l'humanité ne choisissait pas les options moins chères et plus sensées encore à notre portée aujourd'hui.

Avant d'aborder le sujet de la capture du gaz carbonique de l'atmosphère, nous devons mieux comprendre le cycle global du carbone.

Comprendre le CO₂

Au départ, lorsque j'ai envisagé d'écrire ce livre, mon intention était d'ignorer complètement le sujet du changement climatique. Dans certains cercles, la question « le changement climatique a-t-il vraiment lieu ? » est sujette à controverse. Tout comme les questions « Le réchauffement est-il causé par les activités humaines ? » et « Quelle importance ? » Et enfin, tout au bout de cette longue liste de questions : « Que devons-nous faire ? » Il me semblait que l'énergie durable était déjà en elle-même une question impérieuse, et qu'il valait mieux éviter la polémique. Je tenais le raisonnement suivant : « peu importe le moment exact où le stock de combustibles fossiles commencera à s'épuiser, et peu importe que le changement climatique se produise ou non, *le fait de brûler des combustibles fossiles n'est de toute façon pas une solution pérenne*. Imaginons donc un mode de vie durable et déterminons la quantité d'énergie renouvelable disponible ».

Toutefois, la prise de conscience du changement climatique se fait progressivement chez le grand public, et cela soulève toutes sortes de questions intéressantes. J'ai donc décidé d'effleurer ce sujet dans la préface et dans ce chapitre de clôture. Ce n'est certes pas un tour complet de la question, mais cela permettra de produire quelques chiffres intéressants.

Les unités

Les crédits-carbone sont habituellement exprimés en dollars ou en euros par tonne de CO₂. Je vais donc utiliser la *tonne de CO₂* comme unité principale pour parler de pollution au carbone par habitant, et la *tonne de*

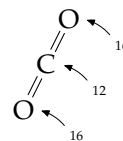


FIGURE 31.1. La masse d'une molécule de CO₂ et celle d'un atome de carbone sont dans un rapport 44 / 12 parce que l'atome de carbone pèse 12 unités et chacun des deux atomes d'oxygène pèsent 16 unités. $12 + 16 + 16 = 44$.

CO₂ par an pour mesurer les taux de pollution. (Les émissions de gaz à effet de serre d'un Européen moyen sont équivalentes à 11 tonnes de CO₂ par an, soit 30 kg de CO₂ par jour). Mais pour parler du carbone dans les combustibles fossiles, la végétation, les sols et l'eau, je vais utiliser des tonnes de carbone. Une tonne de CO₂ contient 12/44 de tonnes de carbone, soit un peu plus d'un quart de tonne. A l'échelle de la planète, je parlerai de gigatonnes de carbone (Gt C). Une gigatonne de carbone fait un milliard de tonnes. Il est difficile d'imaginer ce que fait une gigatonne, mais si vous voulez ramener cette quantité à l'échelle humaine, imaginez-vous en train de brûler une tonne de charbon (ce qui est à peu près ce qu'il vous faut pour chauffer une maison pendant un an). Maintenant, imaginez que

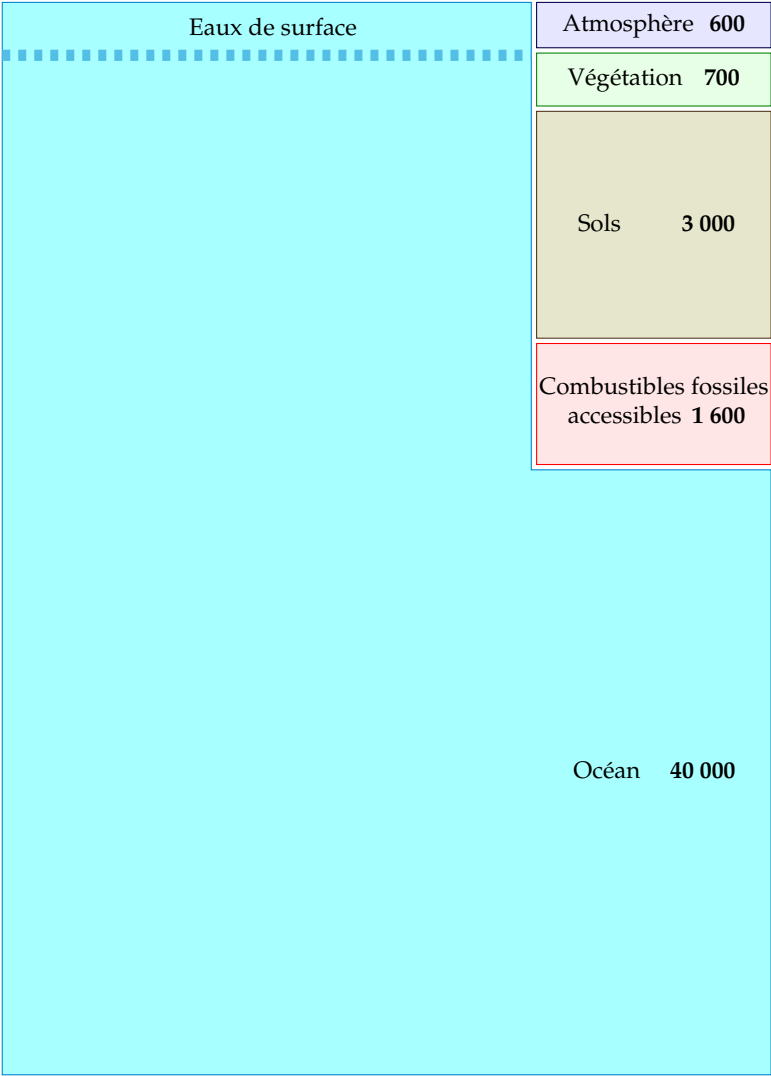


FIGURE 31.2. Quantités estimées de carbone, en gigatonnes, dans les sites accessibles sur Terre. La quantité de carbone dans l'atmosphère indiquée ici (600 Gt) correspond aux valeurs pré-industrielles. Depuis 1850, la quantité de carbone dans l'atmosphère a sensiblement augmenté : actuellement, elle est de l'ordre de 800 Gt. Par ailleurs, il y a aussi énormément de carbone dans les roches ; ce carbone parcourt un cycle complet en des échelles de temps qui se comptent en millions d'années, avec un équilibre à long terme entre le carbone sédimentaire emporté par subduction entre les plaques tectoniques, et le carbone éjecté de temps en temps par les volcans. Pour faire simple, j'ai ignoré ce carbone géologique ici.

chacun sur la planète brûle une tonne de charbon par an. Cela revient à 6 gigatonnes de charbon par an, car nous sommes 6 milliards d'individus sur la planète.

Où est le carbone ?

Où est tout le carbone ? Il nous faut savoir combien on en trouve dans les océans, dans le sol, et dans la végétation, par comparaison avec l'atmosphère, si l'on veut comprendre les conséquences des émissions de CO_2 .

La figure 31.2 nous montre où est le carbone. L'essentiel — 40 000 Gt — se trouve dans l'océan (sous forme de gaz carbonique dissous, de carbonates, de vie végétale et animale et de matière en décomposition). Pris ensemble, les sols et la végétation contiennent environ 3 700 Gt. Les combustibles fossiles accessibles — pour l'essentiel, du charbon — contiennent environ 1 600 Gt. Enfin, l'atmosphère contient autour de 600 Gt de carbone.

Jusqu'à récemment, tous ces stocks de carbone étaient à peu près en équilibre : tous les flux de carbone sortant de l'un de ces réservoirs (disons, les sols, la végétation ou l'atmosphère) étaient équilibrés par des flux entrants équivalents. Les flux entrants et sortants du stock des combustibles fossiles étaient tous deux négligeables. Et puis les hommes se sont mis à brûler des combustibles fossiles. Cela a ajouté deux flux supplémentaires *non compensés*, comme le montre la figure 31.3.

Le rythme auquel les combustibles fossiles sont brûlés était en gros de 1 Gt C/an en 1920, 2 Gt C/an en 1955 et 8,4 Gt C/an en 2006. (Ces chiffres prennent en compte la petite contribution de la production de ciment, qui libère du CO_2 retenu dans du calcaire.)

Comment ce flux supplémentaire significatif de carbone modifie-t-il le diagramme de la figure 31.2 ? Eh bien, on ne sait pas exactement. La figure 31.3 montre les éléments clés qui sont *effectivement* connus. L'essentiel des 8,4 Gt C par an que l'on envoie dans l'atmosphère y reste, ce qui augmente la concentration atmosphérique de dioxyde de carbone. L'atmosphère s'équilibre assez rapidement avec la surface des océans (il faut seulement cinq à dix ans pour que cet équilibre se fasse), ce qui crée un flux net de CO_2 entre l'atmosphère et les eaux océaniques de surface de 2 Gt C par an. (Cependant, des recherches récentes indiquent que le rythme auquel les océans absorbent ce carbone semble ralentir). Ce flux non compensé vers les eaux de surface provoque une acidification des océans, ce qui est une mauvaise nouvelle pour les coraux. Une partie du carbone supplémentaire part aussi dans la végétation et les sols, sans doute à hauteur à 1,5 Gt C par an, mais ces flux sont moins bien mesurés. Puisqu'en gros la moitié des émissions de carbone reste dans l'atmosphère, une pollution au carbone persistante à hauteur de 8,4 Gt C par an va continuer de faire augmenter les niveaux de CO_2 dans l'atmosphère et dans les eaux de surface.

Quelle est la destination à long terme de ce CO_2 supplémentaire ? Eh

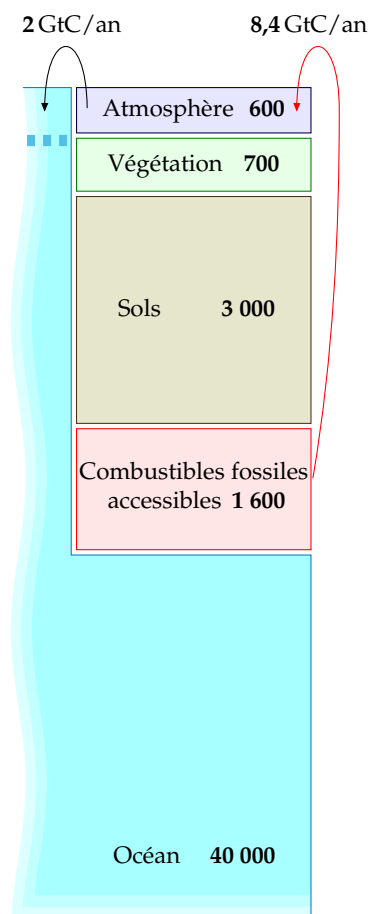


FIGURE 31.3. Les flèches montrent les deux flux de carbone supplémentaires créés en brûlant des combustibles fossiles. Il y a un déséquilibre entre les 8,4 Gt C/an d'émissions vers l'atmosphère d'us à la combustion des combustibles fossiles, et l'absorption de CO_2 à hauteur de 2 Gt C/an par les océans. Ce schéma omet les flux moins bien quantifiés entre l'atmosphère, les sols, la végétation, etc.

bien, puisque la quantité de carbone dans les combustibles fossiles est considérablement plus faible que le total se trouvant dans les océans, « à long terme » le carbone supplémentaire aboutira dans l'océan, et les quantités de carbone dans l'atmosphère, la végétation et les sols reviendront à la normale. Cependant, « à long terme » cela signifie des milliers d'années. L'équilibre entre l'atmosphère et les eaux de *surface* est rapidement atteint, comme dit précédemment, mais les figures 31.2 et 31.3 montrent une ligne pointillée séparant les eaux de surface du reste des océans. A l'échelle de 50 ans, cette limite est comparable à un mur de briques. Le carbone radioactif dispersé sur tout le globe par les essais nucléaires des années 1960 et 1970 n'a pénétré les océans que jusqu'à une profondeur d'environ 400 mètres, alors que la profondeur moyenne des océans est d'environ 4 000 mètres.

Les océans circulent lentement : il faut environ 1 000 ans à un volume d'eau au fond des océans pour remonter à la surface, puis redescendre. La circulation des eaux profondes est entraînée par une combinaison de gradients de température et de salinité, c'est pour cela qu'on la nomme circulation thermohaline (contrairement aux courants de surface, provoqués par les vents).

Ce lent renouvellement des eaux océaniques a une conséquence cruciale : nous avons assez de combustibles fossiles pour modifier sérieusement le climat au cours des 1 000 ans à venir.

Où va le carbone

La figure 31.3 constitue une grossière simplification. Par exemple, certains flux ajoutés par les hommes ne sont pas mentionnés sur ce diagramme : la combustion de la tourbe et des forêts à Bornéo, en 1997, a libéré environ 0,7 Gt C à elle toute seule. Les feux accidentels dans les veines de charbon émettent environ 0,25 Gt C par an.

Néanmoins, ce diagramme apporte une aide précieuse pour comprendre globalement ce qui se passera à court et moyen terme si telle ou telle politique est adoptée. Tout d'abord, si la pollution au carbone poursuit sa trajectoire actuelle (scénario dit « business as usual »), en brûlant 500 Gt C supplémentaires au cours des 50 prochaines années, on peut s'attendre à ce que le carbone continue à pénétrer peu à peu les eaux de surface des océans à un rythme de 2 Gt C par an. En 2055, au moins 100 Gt C parmi ces 500 auront été absorbées par les océans, et la concentration de CO₂ dans l'atmosphère aura en gros doublé par rapport à son niveau préindustriel.

Si l'on cessait complètement de brûler des combustibles fossiles d'ici les années 2050, le flux de 2 Gt de l'atmosphère vers l'océan se réduirait lui aussi de manière significative. (J'ai longtemps cru que ce flux persisterait pendant des décennies, mais cela n'est possible que si les eaux de surface ne sont pas en équilibre avec l'atmosphère ; et comme dit précédemment, cet équilibre est atteint en quelques années à peine). L'essentiel

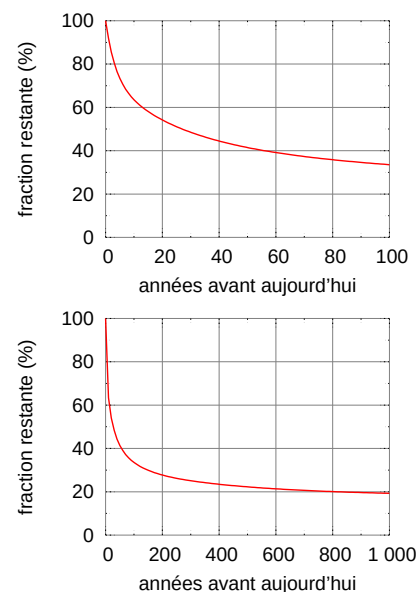


FIGURE 31.4. Décroissance progressive d'un ajout ponctuel de CO₂ à l'atmosphère actuelle, selon le modèle du cycle du carbone de Berne. Source : Hansen et al. (2007).

des 500 Gt que nous aurions alors ajouté à l'atmosphère ne se déverserait que peu à peu dans les océans, ce processus s'étalant sur les quelques milliers d'années suivantes, au rythme du plongeon des eaux de surface et de leur remplacement par de l'eau neuve venue des profondeurs.

Ainsi, la perturbation de la concentration en carbone que nous aurions causée serait finalement corrigée, mais seulement après des milliers d'années. En supposant bien sûr que cette perturbation importante ne modifie pas l'écosystème de manière drastique. Il est envisageable, par exemple, que l'acidification des eaux de surface des océans provoque une extinction de vie marine suffisamment prononcée pour qu'un nouveau cercle vicieux s'enclenche : l'acidification causant une réduction de la biomasse végétale marine, résultant en une moindre absorption du CO₂ par les océans, impliquant alors que les océans deviennent encore plus acides. De tels cercles vicieux (que les scientifiques appellent des « rétroactions positives » ou des « boucles auto-amplificatrices ») se sont déjà produits sur Terre dans le passé : on pense, par exemple, que les ères glaciaires se sont terminées relativement rapidement du fait de cycles de rétroaction positive, au cours lesquels des températures en hausse ont provoqué la fonte de neige et de glace en surface, ce qui a réduit en retour la quantité de lumière solaire renvoyée par le sol ; autrement dit, le sol a absorbé plus de chaleur, ce qui, en retour, a provoqué une hausse des températures. (La neige fondue — c'est-à-dire l'eau liquide — est beaucoup plus sombre que la neige gelée). Une autre rétroaction positive possible et préoccupante concerne les hydrates de méthane, qui sont gelés en quantités énormes (des gigatonnes) dans des endroits comme la Sibérie arctique, et en quantités encore plus énormes (des centaines de gigatonnes) sur les plateaux continentaux océaniques. Un réchauffement climatique de plus de 1 °C pourrait potentiellement faire fondre ces hydrates de méthane et libérer dans l'atmosphère du méthane, qui est un gaz à effet de serre nettement plus puissant que le CO₂.

Ce livre n'est pas le lieu où discuter en détail des incertitudes du changement climatique. Je recommande chaudement la lecture des livres « *Avoiding Dangerous Climate Change* » (Schellnhuber et al., 2006) et « *Global Climate Change* » (Dessler et Parson, 2006) ainsi que les articles écrits par Hansen et al. (2007) et Charney et al. (1979).

L'objectif de ce chapitre est de commenter l'idée de corriger le changement climatique en aspirant le dioxyde de carbone de l'air ambiant. Dans le paragraphe qui vient, nous allons commencer par le coût énergétique de cette aspiration.

Le coût de l'aspiration de carbone

De nos jours, pomper du carbone en provenance du sous-sol, c'est de l'or en barre. A l'avenir, il est possible que ce soit le pompage pour *injecter* du carbone dans le sous-sol qui devienne de l'or en barre. En supposant

que l'on ne fasse pas aujourd'hui les choix qui nous permettraient d'interrompre la pollution planétaire au carbone, il se peut que d'ici quelques décennies, une coalition de bonnes volontés soit prête à payer pour la création d'un aspirateur géant capable de nettoyer la crasse collective.

Avant d'entrer dans de plus amples détails sur la manière dont on pourrait capturer le carbone de l'air ambiant, voyons d'abord le coût énergétique inévitable de la capture du carbone. Quelles que soient les technologies utilisées, elles doivent respecter les lois de la physique, et malheureusement, aspirer le CO₂ de l'air et le concentrer requiert de l'énergie. Ce que disent les lois de la physique, c'est que l'énergie nécessaire doit être au moins de 0,2 kWh par kg de CO₂ (tableau 31.5). Étant donné que les processus réels ont un rendement typique d'au mieux 35 %, je serais stupéfait que le coût énergétique de la capture du carbone puisse être un jour passer sous la barre de 0,55 kWh par kg.

A présent, supposons que l'on souhaite neutraliser les 11 tonnes de CO₂ émises annuellement par un Européen typique, soit 30 kg par jour et par personne. En faisant l'hypothèse d'un coût de 0,55 kWh par kg de CO₂, l'énergie nécessaire est de **16,5 kWh par jour et par personne**. Cela correspond très exactement à la **consommation d'électricité britannique**. Alimenter notre aspirateur géant nous obligerait donc à *doubler* notre production d'électricité — ou, du moins, à nous procurer d'une façon ou d'une autre une puissance supplémentaire égale à notre production d'électricité actuelle.

Si on peut réduire les coûts de fonctionnement de ces aspirateurs géants, c'est génial, faisons-le. Mais toute la recherche et développement du monde ne permettra pas de contourner les lois de la physique, qui indiquent que pour attraper le CO₂ de l'air ambiant et le concentrer au point de pouvoir le liquéfier, il faut au moins 0,2 kWh par kg de CO₂.

Et maintenant, quelle est la meilleure façon d'aspirer le CO₂ de l'air ? Je vais parler de quatre technologies pour construire notre aspirateur géant :

- A. des pompes chimiques ;
- B. des arbres ;
- C. l'érosion accélérée de roches ;
- D. la fertilisation des océans.

A. Méthodes chimiques pour la capture du carbone

Les technologies chimiques traitent généralement le dioxyde de carbone en deux temps.

0,03 % CO₂ concentration → CO₂ pur compression → CO₂ liquide

En premier lieu, elles *concentrent* le CO₂ à partir de la faible concentration de l'atmosphère ; ensuite, elles le *compriment* en un faible volume prêt à être

enfoui quelque part (soit dans un trou dans le sol, soit au fond de l’océan). Chacune de ces étapes a un coût énergétique. Les coûts minimum imposés par les lois de la physique sont ceux que montre le tableau 31.5.

En 2005, les méthodes de capture du CO₂ atmosphérique les plus efficaces ayant fait l’objet d’une publication avaient un rendement vraiment mauvais : le coût énergétique était d’environ 3,3 kWh par kg, avec un coût financier d’environ 140 dollars US par tonne de CO₂. Avec un tel coût énergétique, capturer les 30 kg émis par un Européen coûterait **100 kWh par jour** — presque autant que la consommation en énergie d’un Européen, qui est de 125 kWh par jour. Peut-on concevoir des aspirateurs plus efficaces ?

Récemment, Wallace Broecker, un climatologue, « peut-être le plus éminent des interprètes du fonctionnement de la Terre en tant que système biologique, chimique et physique au monde » s’est fait l’avocat d’une technologie alors non encore publiée, et développée par le physicien Klaus Lackner, pour capturer le CO₂ de l’air. Broecker imagine que le monde pourrait continuer à brûler des combustibles fossiles à peu près au même rythme qu’aujourd’hui, et que 60 millions d’éponges à CO₂ (chacune ayant la taille d’un container standard, en position debout) nettoieraient le CO₂ émis. De combien d’énergie le processus de Lackner aurait-il besoin ? En juin 2007, Lackner m’a dit que son labo parvenait à 1,3 kWh par kg, mais depuis, son équipe a développé un nouveau processus reposant sur l’utilisation d’une résine qui absorbe le CO₂ lorsqu’elle est sèche, et le libère lorsqu’elle est humide. En juin 2008, Lackner m’a indiqué que sous un climat sec, le coût de concentration avait été réduit à entre 0,18 et 0,37 kWh de chaleur de faible qualité par kg de CO₂. Le coût de compression est de 0,11 kWh par kg. Par conséquent, le coût total de la méthode Lackner est de 0,48 kWh ou moins par kg de CO₂. Pour des émissions européennes de 30 kg de CO₂ par jour, cela veut dire que l’on parle toujours d’un coût d’environ **14 kWh par jour**, dont **3,3 kWh par jour** d’électricité, et le reste sous forme de chaleur.

Vive le progrès technique ! Cependant, ne croyez surtout pas qu’il s’agisse d’un *faible* coût. Cela imposerait d’augmenter d’à peu près 20 % la production mondiale d’énergie, rien que pour faire fonctionner les aspirateurs géants.

B. Et les arbres ?

Les arbres sont des systèmes à capturer le carbone : ils aspirent le CO₂ de l’air, sans pour autant violer aucune loi de la physique. Ce sont des machines deux-en-un : des usines de capture de carbone alimentées par des centrales solaires embarquées. Ils capturent le carbone en utilisant l’énergie obtenue à partir de la lumière du soleil. Les combustibles fossiles que nous brûlons ont été initialement créés par ce processus. La suggestion est donc : on brûle des combustibles fossiles ; et si on essayait le processus

	coût (kWh/kg)
concentration	0,13
compression	0,07
total	0,20

TABLEAU 31.5. Le coût énergétique inévitable pour concentrer et comprimer du CO₂ aspiré de l’air ambiant.



inverse ? Si on produisait du bois pour l'enterrer dans un trou dans le sol, tandis qu'à côté, l'humanité continuerait à déterrer du bois fossilisé et à y mettre le feu ? Cela peut paraître loufoque d'imaginer vouloir créer du bois pour l'enfouir en même temps qu'on déterre du bois précédemment enfoui. Mais bon, essayons quand même de calculer la surface de terres nécessaire pour résoudre le problème du climat avec des arbres.

Les meilleures plantes en Europe capturent le carbone à un rythme d'environ 10 tonnes de bois sec par hectare et par an — ce qui équivaut à environ 15 tonnes de CO₂ par hectare et par an. Donc, pour compenser les émissions d'un Européen, c'est-à-dire 11 tonnes de CO₂ par an, il nous faut 7 500 mètres carrés de forêt par personne. Cette surface requise de 7 500 m² par personne, c'est *deux fois la surface de Grande-Bretagne* par personne. Et ensuite, il vous faudrait trouver un endroit pour stocker de manière permanente 7,5 tonnes de bois par personne et par an ! Avec une densité de 500 kg par m³, le bois de chaque personne occuperait 15 m³ par an. Le bois de toute une vie — qu'il faut, ne l'oubliez pas, stocker précieusement et ne jamais brûler — occuperait 1 000 m³. C'est cinq fois le volume d'une maison moyenne. Si quelqu'un propose un jour de rectifier le changement climatique en plantant des arbres, il faut que cette personne comprenne que les installations nécessaires devront avoir la taille du pays entier. Je ne vois pas comment cela pourrait marcher un jour.

1 hectare = 10 000 m²

surface de Grande-Bretagne par personne
 ≃ 4 000 m²

C. L'érosion accélérée de roches

Y a-t-il une manière détournée d'éviter le coût énergétique significatif de l'approche chimique pour aspirer le carbone ? Voici une idée intéressante : pulvériser des rochers qui sont capables d'absorber du CO₂, et les laisser à l'air libre. Cette idée peut être présentée comme l'accélération d'un processus géologique naturel. Je m'explique.

Il y a deux flux de carbone que j'ai oubliés dans la figure 31.3 : le flux de carbone allant des roches vers les océans, qui est associé à l'érosion naturelle des roches ; et la précipitation naturelle du carbone sous forme de sédiments marins, qui finissent par se transformer en roche. Ces flux sont relativement petits, et mettent en jeu de l'ordre de 0,2 Gt C par an (soit 0,7 Gt CO₂ par an). Ils sont donc éclipsés par les émissions anthropiques de carbone actuelles, qui sont environ 40 fois plus élevées. Mais l'idée des promoteurs de l'érosion accélérée de roches est que l'on pourrait rectifier le changement climatique en augmentant le rythme auquel les roches sont broyées et absorbent le CO₂. Parmi les roches à broyer adaptées, on trouve des olivines ou des minerais de silicate de magnésium, qui sont très répandus. L'idée serait de trouver des mines entourées de nombreux kilomètres carrés de terrains sur lesquels les roches broyées pourraient être étalées, voire de disperser ces roches broyées directement dans les océans. De l'une ou l'autre des manières, ces roches absorberaient le CO₂ et se transformeraient en carbonates qui seraient ensuite lessivées pour s'accu-

muler au fond des océans. Pulvériser des roches pour en obtenir des grains suffisamment petits pour réagir avec du CO_2 aurait un coût de seulement **0,04 kWh par kg de CO_2 aspiré**. Un instant ! Ça fait moins que les 0,20 kWh par kg qu'imposent les lois de la physique, ça ! Oui, mais il n'y a pas d'erreur : les roches elles-mêmes sont la source de l'énergie manquante. Les silicates possèdent une énergie plus élevée que les carbonates, et ce sont les roches qui paient le coût énergétique d'aspiration du CO_2 de l'air.

La faible quantité d'énergie de ce projet me plaît bien, mais la question qui fâche, c'est : qui serait volontaire pour couvrir son pays de roches pulvérisées ?

D. Fertiliser les océans

L'un des problèmes des méthodes chimiques ou des approches faisant appel aux arbres ou à la pulvérisation de roches pour absorber du CO_2 de l'air, c'est qu'à chaque fois, cela impose beaucoup de travail, et que personne n'a intérêt à le faire — à moins qu'un accord international ne finance le coût de la capture du carbone. Pour l'instant, le prix du carbone est trop faible.

Une dernière idée pour absorber le carbone pourrait éluder cette difficulté. On pourrait persuader l'océan de capturer le carbone un peu plus vite que ce qu'il fait normalement, par le biais d'un sous-produit de l'élevage piscicole.

Certaines régions du monde souffrent de pénuries de nourriture. De nombreux endroits du monde connaissent des pénuries en poisson, du fait de la surpêche qui a eu lieu ces 50 dernières années. Le principe de la *fertilisation des océans* est de stimuler la base de la chaîne alimentaire

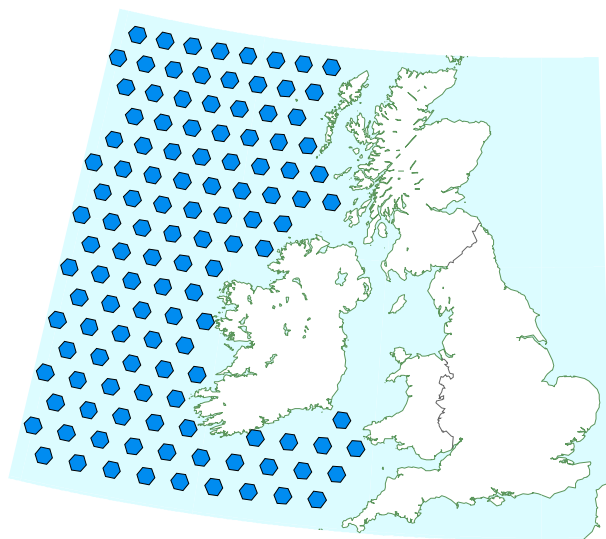


FIGURE 31.6. 120 zones dans l'océan Atlantique, couvrant chacune 900 km^2 . Cela représente la superficie estimée nécessaire pour compenser les émissions de carbone de Grande-Bretagne en fertilisant l'océan.

marine, ce qui permettrait aux océans de contenir plus de vie végétale et animale, et au passage, de fixer plus de carbone. Avec le scientifique australien Ian Jones en chef de file, les ingénieurs qui travaillent sur la fertilisation des océans voudraient injecter un engrais contenant de l'azote, comme de l'urée, dans des zones adaptées et actuellement pauvres en poisson. Ils avancent que 900 km² d'océan fertilisé pourraient absorber environ 5 Mt CO₂/an. Jones et ses collègues considèrent que la fertilisation des océans est applicable à toute zone océanique pauvre en azote. Cela inclut l'essentiel de l'Atlantique Nord. Mettons cette idée sur une carte. Les émissions de carbone du Royaume-Uni sont d'environ 600 Mt CO₂/an. Une neutralisation complète des émissions de carbone du Royaume-Uni imposerait donc d'utiliser 120 de ces zones dans l'océan. La carte de la figure 31.6 montre ces zones à l'échelle à côté des îles britanniques. Comme d'habitude, pour que son compte soit bon, un plan de ce type impose des installations de la taille du pays entier ! Et nous n'avons même pas encore évoqué la manière dont on pourrait produire la quantité nécessaire d'urée.

Cependant, même s'il s'agit d'une idée encore non testée et, pour le moment, encore illégale, je trouve l'idée de la fertilisation des océans vraiment intéressante, parce que contrairement au stockage géologique du carbone, sa mise en œuvre serait possible même si la communauté internationale ne s'accorde pas pour donner une valeur élevée au nettoyage de la pollution au carbone ; les pêcheurs pourraient fertiliser les océans simplement pour attraper plus de poisson.

On peut s'attendre à ce que les commentateurs s'opposent à la manipulation des océans, axant leur critique sur les incertitudes plutôt que sur les bénéfices potentiels. Ils joueront sur la peur de l'inconnu auprès du grand public. Les gens sont prêts à accepter passivement l'aggravation d'une pratique établie (par exemple, déverser du CO₂ dans l'atmosphère) tout en restant méfiants vis-à-vis des innovations susceptibles d'améliorer leur bien-être futur. Il y a deux poids, deux mesures dans leur aversion au risque.

Ian Jones

Nous, l'humanité, ne pouvons pas libérer dans l'atmosphère tout ou même l'essentiel du CO₂ provenant des combustibles fossiles. Si nous le faisons, ce serait l'assurance d'un changement climatique spectaculaire qui aboutirait à une autre planète que celle que nous connaissons...

J. Hansen et al (2007)

« Éviter un changement climatique dangereux » est impossible — le changement climatique dangereux est déjà là. La vraie question, c'est : peut-on encore éviter un changement climatique catastrophique ?

David King, Conseiller scientifique en chef du Royaume-Uni, 2007



Notes et bibliographie

Page n°

- 284 *Dans certains cercles, la question « le changement climatique a-t-il vraiment lieu ? » est sujette à controverse.* Il y a, en effet, toujours un « gouffre béant entre les opinions dominantes au sujet du changement climatique au sein des élites éduquées d'Europe et d'Amérique. » [voxbz].
- 286 *Où est le carbone ?* Sources : Schellnhuber et al. (2006), Davidson et Janssens (2006).
- *Le rythme auquel les combustibles fossiles sont brûlés...* Source : Marland et al. (2007).
 - *Des recherches récentes indiquent que le rythme auquel les océans absorbent ce carbone semble ralentir.* www.timesonline.co.uk/tol/news/uk/science/article1805870.ece, www.sciencemag.org/cgi/content/abstract/1136188, [yofchc], Le Quéré et al. (2007).
 - *En gros la moitié des émissions de carbone reste dans l'atmosphère.* Il faut 2,1 milliards de tonnes de carbone dans l'atmosphère (7,5 Gt CO₂) pour augmenter la concentration atmosphérique de CO₂ d'une partie par million (1 ppm). Si tout le CO₂ qu'on injecte dans l'atmosphère y restait, la concentration augmenterait de plus de 3 ppm par an — mais en fait, elle n'augmente que de 1,5 ppm par an.
- 287 *Le carbone radioactif... n'a pénétré dans l'océan que jusqu'à une profondeur de 400 mètres.* Sur tous les sites d'observation, la profondeur moyenne de pénétration du ¹⁴C provenant de bombes, trouvée à la fin des années 1970, était de 390±39 m (Broecker et al., 1995). Cette donnée provient de [3e28ed].
- 288 *Un réchauffement climatique de plus de 1 °C pourrait potentiellement faire fondre ces hydrates de méthane.* Source : Hansen et al. (2007, p1942).
- « Avoiding Dangerous Climate Change » (Schellnhuber et al., 2006) et « Global Climate Change » (Dessler et Parson, 2006). A ce jour, ces ouvrages n'ont pas été traduits en français [NdT].
- 290 *Tableau 31.5. Le coût énergétique inévitable pour concentrer et comprimer du CO₂ aspiré de l'air ambiant.* Les besoins énergétiques qu'on ne peut éviter pour concentrer le CO₂ de 0,03 % à 100 % à la pression atmosphérique est de $kT \ln 100/0,03$ par molécule, ce qui fait **0,13 kWh par kg**. Le coût énergétique idéal de compression du CO₂ à 110 bars (une pression couramment citée pour un stockage géologique) est de **0,067 kWh/kg**. Le coût total idéal de la capture et de la compression du CO₂ est donc de **0,2 kWh/kg**. Selon le rapport spécial du GIEC sur la capture et la séquestration du carbone, le coût de la seconde étape, la compression du CO₂ à 110 bars, est en pratique de **0,11 kWh par kg**. (0,4 GJ par tonne de CO₂ ; 18 kJ par mole de CO₂ ; 7 kT par molécule.)
- *Enfouir le CO₂ dans un trou dans le sol ou au fond de l'océan.* Se référer à Williams (2000) pour la discussion de ce sujet. « Pour qu'une large part du CO₂ injecté reste dans l'océan, l'injection doit se faire à une grande profondeur. Un consensus est en train d'être élaboré, selon lequel la meilleure stratégie pour s'approcher de l'objectif serait de libérer le CO₂ à des profondeurs de 1 000 à 1 500 mètres, ce qui peut être fait avec les technologies actuelles. » Voir aussi le rapport spécial du GIEC : www.ipcc.ch/ipccreports/srccs.htm.
 - *En 2005, les méthodes de capture du CO₂ atmosphérique les plus efficaces avaient un rendement vraiment mauvais : le coût énergétique était d'environ 3,3 kWh par kg, avec un coût financier d'environ 140 dollars US par tonne de CO₂.* Sources : Keith et al. (2005), Lackner et al. (2001), Herzog (2003), Herzog (2001), David et Herzog (2000).
 - *Wallace Broecker, un climatologue...* www.af-info.or.jp/eng/honor/hot/enrbro.html. Son livre faisant la promotion des arbres artificiels : Broecker et Kunzig (2008).
- 291 *Les meilleures plantes en Europe capturent le carbone à un rythme d'environ 10 tonnes de bois sec par hectare et par an.* Source : Select Committee on Science and Technology.

- *L'érosion accélérée des roches*. Voir Schuiling et Krijgsman (2006).
- 293 *La fertilisation des océans*. Voir Judd et al. (2008). Voir aussi Chisholm et al. (2001). Les risques de la fertilisation des océans sont discutés dans Jones (2008).

32 *Dire oui*

Parce qu'aujourd'hui, la Grande-Bretagne tire 90 % de son énergie des combustibles fossiles, il ne faut pas s'étonner que leur abandon impose de faire de très, très grands changements — changer intégralement la flotte utilisée pour se déplacer ; changer intégralement le système de chauffage de la plupart des bâtiments ; multiplier par 10 à 20 la production d'énergie verte.

Compte tenu de la tendance générale de la population à dire « non » — « non » aux fermes éoliennes, « non » au nucléaire, « non » aux barrages marémoteurs, « non » à tout ce qui ne brûle pas des combustibles fossiles, en fait — nous risquons de ne pas nous débarrasser des combustibles fossiles à temps, et cela m'inquiète. Au lieu de cela, on se concentre sur des demi-mesures : des centrales électriques qui brûlent des combustibles fossiles avec un rendement un petit peu meilleur ; des voitures et des systèmes de chauffage domestiques un tout petit peu plus efficaces ; un système d'échange de permis d'émissions de carbone qui sert de cache-sexe ; un saupoudrage d'éoliennes ; un nombre inadapté de centrales nucléaires.

Il nous faut un plan dont le compte soit bon. *Il nous est possible* de faire un plan dont le compte est bon. Mais ce ne sera pas facile.

Il faut qu'on arrête de dire non, et qu'on commence à dire oui. Il faut qu'on arrête le spectacle de Guignol et qu'on s'y mette vraiment.

Si vous souhaitez vraiment qu'une politique énergétique honnête, réaliste et qui fasse le compte soit adoptée, dites-le à vos représentants élus et aux candidats qui se présentent à votre suffrage.

Remerciements

Pour m'avoir amené jusqu'à l'écologie, je remercie Robert MacKay, Gale Ryba et Mary Archer.

Pour des décennies de conversations intenses sur chaque détail, merci à Matthew Bramley, Mike Cates et Tim Jervis.

Pour les bonnes idées, pour l'inspiration, pour m'avoir suggéré de bonnes tournures de phrase, pour leurs critiques constructives, pour leurs encouragements, je remercie les personnes suivantes, qui ont toutes donné forme à ce livre : John Hopfield, Sanjoy Mahajan, Iain Murray, Ian Fells, Tony Benn, Chris Bishop, Peter Dayan, Zoubin Ghahramani, Kimber Gross, Peter Hodgson, Jeremy Lefroy, Robert MacKay, William Nuttall, Mike Shepard, Ed Snelson, Quentin Stafford-Fraser, Prashant Vaze, Mark Warner, Seb Wills, Phil Cowans, Bart Ullstein, Helen de Mattos, Daniel Corbett, Greg McMullen, Alan Blackwell, Richard Hills, Philip Sargent, Denis Molli-son, Volker Heine, Olivia Morris, Marcus Frean, Erik Winfree, Caryl Walter, Martin Hellman, Per Sillrén, Trevor Whittaker, Daniel Nocera, Jon Gibbins, Nick Butler, Sally Daultrey, Richard Friend, Guido Bombi, Alessandro Pastore, John Peacock, Carl Rasmussen, Phil C. Stuart, Adrian Wrigley, Jonathan Kimmitt, Henry Jabbour, Ian Bryden, Andrew Green, Montu Saxena, Chris Pickard, Kele Baker, Davin Yap, Martijn van Veen, Sylvia Frean, Janet Lefroy, John Hinch, James Jackson, Stephen Salter, Derek Bendall, Deep Throat, Thomas Hsu, Geoffrey Hinton, Radford Neal, Sam Roweis, John Winn, Simon Cran-McGreehin, Jackie Ford, Lord Wilson of Tillyorn, Dan Kammen, Harry Bhadeshia, Colin Humphreys, Adam Kalinowski, Anahita New, Jonathan Zwart, John Edwards, Danny Harvey, David Howarth, Andrew Read, Jenny Smithers, William Connolley, Ariane Kossack, Sylvie Marchand, Phil Hobbs, David Stern, Ryan Woodard, Noel Thompson, Matthew Turner, Frank Stajano, Stephen Stretton, Terry Barker, Jonathan Köhler, Peter Pope, Aleks Jakulin, Charles Lee, Dave Andrews, Dick Glick, Paul Robertson, Jürg Matter, Alan and Ruth Foster, David Archer, Philip Sterne, Oliver Stegle, Markus Kuhn, Keith Vertanen, Anthony Rood, Pilgrim Beart, Ellen Nisbet, Bob Flint, David Ward, Pietro Perona, An-drew Urquhart, Michael McIntyre, Andrew Blake, Anson Cheung, Daniel Wolpert, Rachel Warren, Peter Tallack, Philipp Hennig, Christian Steinrücken, Tamara Broderick, Demosthenis Pafitis, David Newbery, Annee Blott, Henry Leveson-Gower, John Colbert, Philip Dawid, Mary Waltham, Philip Slater, Christopher Hobbs, Margaret Hobbs, Paul Chambers, Michael Schlup, Fiona Harvey, Jeremy Nicholson, Ian Gardner, Sir John Sulston, Michael Fairbank, Menna Clatworthy, Gabor Csanyi, Stephen Bull, Jonathan Yates, Michael Sutherland, Michael Payne, Simon Learmount, John Riley, Lord John Browne, Cameron Freer, Parker Jones, Andrew Stobart, Peter Ravine, Anna Jones, Peter Brindle, Eoin Pierce, Willy Brown, Graham Treloar, Robin Smale, Dieter Helm, Gordon Tay-lor, Saul Griffith, David Cebonne, Simon Mercer, Alan Storkey, Giles Hodgson, Amos Storkey, Chris Williams, Tristan Collins, Darran Messum, Simon Singh, Gos Micklem, Peter Guthrie, Shin-Ichi Maeda, Candida Whitmill, Beatrix Schlarb-Ridley, Fabien Petitcolas, Sandy Polak, Dino Seppi, Tadashi Tokieda, Lisa Willis, Paul Weall, Hugh Hunt, Jon Fairbairn, Miloš T. Kojašević, Andrew Howe, Ian Leslie, Andrew Rice, Miles Hember, Hugo Willson, Win Rampen, Nigel Goddard, Richard Dietrich, Gareth Gretton, David Sterratt, Jamie Turner, Alistair Morfey, Rob Jones, Paul McKeigue, Rick Jefferys, Robin S Berlingo, Frank Kelly, Michael Kelly, Scott Kelly, Anne Miller, Malcolm Mackley, Tony Juniper, Peter Milloy, Cathy Kunkel, Tony Dye, Rob Jones, Garry Whatford, Francis Meyer, Wha-Jin Han, Brendan McNamara, Michael Laughton, Dermot McDonnell, John McCone, Andreas Kay, John McIntyre, Denis Bonnelle, Ned Ekins-Daukes, John Daglish, Jawed Karim, Tom Yates, Lucas Krui-jswijk, Sheldon Greenwell, Charles Copeland, Georg Heidenreich, Colin Dunn, Steve Foale, Leo Smith, Mark McAndrew, Bengt Gustafsson, Roger Pharo, David Calderwood, Graham Pendlebury, Brian Collins, Paul Has-ley, Martin Dowling, Martin Whiteland, Andrew Janca, Keith Henson, Graeme Mitchison, Valerie MacKay, Dewi Williams, Nick Barnes, Niall Mansfield, Graham Smith, Wade Amos, Sven Weier, Richard McMahon, Andrew Wallace, Corinne Meakins, Eoin O'Carroll, Iain McClatchie, Alexander Ac, Mark Suthers, Gustav Grob, Ibrahim

Dincer, Ian Jones, Adnan Midilli, Chul Park, David Gelder, Damon Hart-Davis, George Wallis, Philipp Spöth, James Wimberley, Richard Madeley, Jeremy Leggett, Michael Meacher, Dan Kelley, Tony Ward-Holmes, Charles Barton, James Wimberley, Jay Mucha, Johan Simu, Stuart Lawrence, Nathaniel Taylor, Dickon Pinner, Michael Davey, Michael Riedel, William Stoett, Jon Hilton, Mike Armstrong, Tony Hamilton, Joe Burlington, David Hovey, Jim Brough, Mark Lynas, Hezlin Ashraf-Ball, Jim Oswald, John Lightfoot, Carol Atkinson, Nicola Terry, George Stowell, Damian Smith, Peter Campbell, Ian Percival, David Dunand, Nick Cook, Leon di Marco, Dave Fisher, John Cox, Jonathan Lee, Richard Procter, Matt Taylor, Carl Scheffler, Roger Sewell, Shirley Dex, Chris Burgoyne, Francisco Monteiro, Ian McChesney, Alex White, et Liz Moyer. Merci à toutes et à tous.

Pour son aide pour trouver des données climatiques, je remercie Emily Shuckburgh. Je suis très reconnaissant à Kele Baker d'avoir rassemblé les données sur les voitures électriques de la figure 20.21. Je remercie également David Sterratt pour leurs contributions à la recherche, et Niall Mansfield, Jonathan Zwart et Anna Jones pour leurs excellents conseils éditoriaux.

Les erreurs qui subsistent sont bien évidemment les miennes.

Je suis particulièrement redevable envers Seb Wills, Phil Cowans, Oliver Stegle, Patrick Welche et Carl Scheffler pour avoir fait en sorte que mes ordinateurs continuent à fonctionner.

Je remercie l'African Institute for Mathematical Sciences, de la ville du Cap, en Afrique du sud, et l'Isaac Newton Institute for Mathematical Sciences de Cambridge, pour leur hospitalité.

Des remerciements appuyés au Digital Technology Group, du Computer Laboratory de Cambridge et au département de Physique de la Heriot-Watt University, pour m'avoir fourni des données météorologiques en ligne. Je suis reconnaissant envers Jersey Water et Guernsey Electricity pour les visites de leurs installations.

Merci à Gilby Productions pour avoir fourni le service des TinyURL. TinyURL est une marque déposée de Gilby Productions.

Merci à Eric Johnston et à Satellite Signals Limited pour m'avoir fourni une belle interface pour les cartes [www.satsig.net].

Merci à David Stern pour le portrait, à Becky Smith pour son travail sur les images, et à Claire Jervis pour les photos des pages vii, 37, 107, 113, 182, 290, 341, et 381. Pour les autres photos, je remercie Robert MacKay, Eric LeVin, Marcus Frean, Rosie Ward, Harry Bhadeshia, Catherine Huang, Yaan de Carlan, Pippa Swannell, Corinne Le Quéré, David Faïman, Kele Baker, Tim Jervis, et les contributeurs anonymes de Wikipedia. Je suis redevable envers le bureau du maire de Londres pour m'avoir fourni des copies de publicités.

L'image en page 284 s'intitule « *Maid in London* », et en page 339, « *Sunflowers* », par Banksy www.banksy.co.uk. Merci, Banksy !

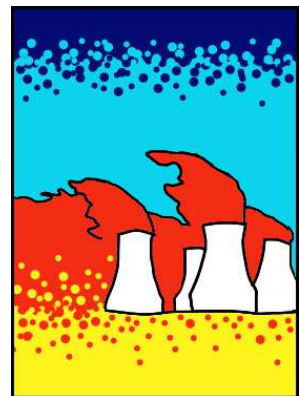
Les services de compensation ont été fournis par cheatneutral.com.

Ce livre est écrit avec L^AT_EX sur un système Ubuntu GNU/Linux et des logiciels libres. Les figures ont été dessinées avec gnuplot et metapost. Nombre des cartes ont été créées avec le logiciel gmt de Paul Wessel et Walter Smith. Merci également à Martin Weinelt et OMC. Merci à Donald Knuth, Leslie Lamport, Richard Stallman, Linus Torvalds, et tous ceux qui contribuent au logiciel libre.

Pour terminer, c'est en la Gatsby Charitable Foundation que je suis le plus redevable, pour nous avoir soutenus, moi et mon groupe de recherche, avant, pendant et après l'écriture de ce livre.

Troisième partie

Chapitres techniques



A Voitures II

Nous avons estimé précédemment qu'une voiture qui parcourt 100 km consommait environ 80 kWh d'énergie.

Où cette énergie part-elle ? Dans quelle mesure est-ce que cela dépend des caractéristiques de la voiture ? Est-ce qu'on pourrait faire des voitures 100 fois plus efficaces ? Faisons un simple schéma décrivant le déplacement de la voiture, pour voir où l'énergie s'en va.

L'énergie d'une voiture typique qui brûle des combustibles fossiles part principalement dans quatre directions, que nous allons toutes explorer les unes après les autres :

1. l'accélération, et le ralentissement qui utilise les freins ;
2. la résistance de l'air ;
3. la résistance au roulement ;
4. la chaleur — 75 % de l'énergie s'échappe sous forme de chaleur, parce que la chaîne de conversion énergétique a un mauvais rendement.

Au début, notre schéma va négliger la résistance au roulement ; nous prendrons cet effet en compte un peu plus loin dans le chapitre.

Supposons que le conducteur accélère rapidement jusqu'à atteindre la vitesse de croisière v , puis qu'il maintient cette vitesse sur une distance d , qui est la distance entre deux feux de circulation, panneaux stop ou embouteillages. A ce moment-là, il écrase les freins et transforme toute son énergie cinétique en chaleur grâce aux freins. (Ce véhicule ne dispose pas de système sympathique de récupération d'énergie au freinage.) Une fois qu'il peut repartir, il accélère à nouveau jusqu'à atteindre sa vitesse de croisière, v . Cette accélération fournit de l'énergie cinétique à la voiture ; freiner jette l'énergie cinétique par dessus bord via les freins.

En fait, l'énergie ne part pas que dans les freins : lorsque la voiture se déplace, elle crée des tourbillons dans l'air qui l'entoure. Elle laisse derrière elle un tube d'air tourbillonnant qui se déplace à une vitesse proche de v . Laquelle de ces deux formes d'énergie est la plus importante : l'énergie cinétique, ou la chaleur dissipée par les freins ? Tâchons de le déterminer.

- La voiture accélère et ralentit une fois par période de temps d/v . Le rythme auquel de l'énergie est déversée dans les freins est :

$$\frac{\text{énergie cinétique}}{\text{temps entre deux freinages}} = \frac{\frac{1}{2}m_c v^2}{d/v} = \frac{\frac{1}{2}m_c v^3}{d}, \quad (\text{A.1})$$

où m_c est la masse de la voiture.

- Le tube d'air créé en un temps t a un volume Avt , où A est la surface de la section transversale du tube, qui est semblable à la surface de la vue avant de la voiture. (Pour une voiture aérodynamique, A est généralement un peu plus petit que la surface frontale A_{car} , et la part



FIGURE A.1. Une Peugeot 206 a un coefficient de pénétration dans l'air (C_x) de 0,33. Photo de Christopher Batt.

La formule-clé pour la plupart des calculs de ce livre est la suivante :

$$\text{énergie cinétique} = \frac{1}{2}mv^2.$$

Par exemple, une voiture de masse $m = 1\,000$ kg qui se déplace à 100 km par heure, soit $v = 28$ m/s, a une énergie de

$$\frac{1}{2}mv^2 \simeq 390\,000 \text{ J} \simeq 0,1 \text{ kWh}.$$

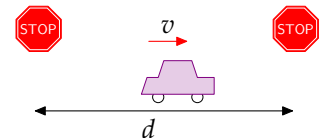


FIGURE A.2. Notre schéma : une voiture se déplace à la vitesse v entre deux arrêts distants de d .

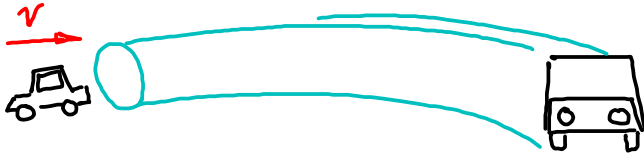


FIGURE A.3. Une voiture se déplaçant à la vitesse v crée derrière elle un tube d'air tourbillonnant ; la surface d'une section transversale de ce tube est semblable à la surface frontale de la voiture, et la vitesse à laquelle l'air du tube tourbillonne est à peu près v .

de la surface efficace du tube rapportée à la surface frontale de la voiture est appelée le coefficient de pénétration dans l'air c_d . Tout au long des équations qui suivent, A désignera la surface frontale de la voiture, $c_d A_{\text{voiture}}$.) Le tube a une masse $m_{\text{air}} = \rho A v t$ (où ρ est la densité de l'air) et il tourbillonne en avançant à la vitesse v ; son énergie cinétique est donc égale à :

$$\frac{1}{2} m_{\text{air}} v^2 = \frac{1}{2} \rho A v t v^2,$$

et le rythme de génération de l'énergie cinétique dans l'air tourbillonnant est de :

$$\frac{\frac{1}{2} \rho A v t v^2}{t} = \frac{1}{2} \rho A v^3.$$

Le rythme total auquel la voiture produit de l'énergie est donc le suivant :

$$\begin{aligned} \text{puissance qui part dans les freins} &+ \text{puissance qui part dans les tourbillons de l'air} \\ = \frac{1}{2} m_c v^3 / d &+ \frac{1}{2} \rho A v^3. \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

Les deux formes de dissipation d'énergie sont en v^3 . Ce schéma prédit donc qu'un conducteur qui réduit sa vitesse v de moitié divise sa consommation de puissance par 8. S'il finit par parcourir la même distance en tout, son trajet prendra deux fois plus de temps, mais la quantité totale d'énergie qu'il aura consommée pendant son trajet sera quatre fois plus petite.

Laquelle des deux formes de dissipation d'énergie — les freins ou les tourbillons de l'air — est la plus grande ? Cela dépend du rapport :

$$(m_c / d) / (\rho A)$$

Si ce rapport est plus grand que 1, alors il y a plus de puissance qui part dans les freins ; s'il est plus petit que 1, alors il y a plus de puissance qui part dans l'air, sous forme de tourbillons. En écrivant différemment ce rapport, on trouve qu'il est supérieur à 1 si :

$$m_c > \rho A d.$$

Ici, $A d$ est le volume du tube d'air entre un arrêt et le suivant. Et $\rho A d$ est la masse de ce tube d'air. On a donc une situation extrêmement simple : dans l'énergie dissipée totale, l'énergie cinétique qui part dans les freins

J'utilise la formule suivante :

masse = densité $\times$ volume

Le symbole ρ (lettre grecque 'rho') désigne la densité.

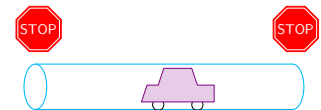


FIGURE A.4. Pour savoir si ce sont les freins ou les tourbillons créés dans l'air qui sont prépondérants dans la consommation d'énergie, on compare la masse de la voiture avec celle du tube d'air entre deux panneaux stop.



FIGURE A.5. La puissance consommée par une voiture est proportionnelle à la surface de sa section transversale sur autoroute, et à sa masse en ville. De ces deux véhicules, devinez lequel a la consommation la plus réduite : la Volkswagen à gauche, ou la navette spatiale à droite ?

est prépondérante si la masse de la voiture est *supérieure* à la masse du tube d'air entre deux arrêts ; l'énergie dissipée en créant des tourbillons dans l'air est prépondérante si la masse de la voiture est *plus petite* que celle du tube d'air (figure A.4).

Déterminons la distance particulière d^* entre deux arrêts, en dessous de laquelle l'action des freins est prépondérante dans la dissipation d'énergie, et au-dessus de laquelle ce sont les tourbillons de l'air (on dit aussi : la traînée) qui le sont. Si la surface frontale de la voiture est de :

$$A_{\text{voiture}} = 2 \text{ m de large} \times 1,5 \text{ m de haut} = 3 \text{ m}^2$$

que le coefficient de pénétration vaut $c_d = 1/3$, et que la masse vaut $m_c = 1\,000 \text{ kg}$, alors cette distance particulière est de :

$$d^* = \frac{m_c}{\rho c_d A_{\text{car}}} = \frac{1\,000 \text{ kg}}{1,3 \text{ kg/m}^3 \times \frac{1}{3} \times 3 \text{ m}^2} = 750 \text{ m}.$$

On en conclut que dans la « conduite en ville », l'énergie cinétique et le freinage sont prépondérants si la distance entre deux arrêts est inférieure à 750 mètres. Dans ces conditions, si vous voulez économiser l'énergie, il vaut mieux :

1. réduire la masse de votre voiture ;
2. avoir une voiture capable de récupérer l'énergie au freinage (ce qui, en gros, divise par deux l'énergie perdue lorsque la voiture freine — voir le chapitre 20) ; et
3. conduire plus lentement.

Lorsque les arrêts sont distants de nettement plus de 750 mètres, la traînée devient prépondérante dans la dissipation d'énergie. Dans ces conditions, la masse de votre voiture importe peu. Et la dissipation d'énergie sera à peu près la même que votre voiture transporte une seule personne ou bien six. Dans ce cas, on peut réduire la dissipation d'énergie :

1. en réduisant le coefficient de pénétration dans l'air de la voiture ;
2. en réduisant la surface de sa section transversale ; ou
3. en roulant moins vite.

La consommation d'énergie réelle de la voiture sera la dissipation d'énergie dans l'équation A.2, poussée à la hausse par un facteur lié à l'inefficacité du moteur et de la transmission. Les voitures à essence typiques ont un

rendement d’environ 25 %. De toute l’énergie chimique qu’une voiture ingurgite, les trois quarts sont gâchés et partent dans le moteur, le radiateur et le pot d’échappement de la voiture ; un quart seulement est de l’énergie « utile » :

puissance totale d’une voiture $\simeq 4 \left[\frac{1}{2} m_c v^3 / d + \frac{1}{2} \rho A v^3 \right]$.

Tâchons de vérifier ce modèle sur les voitures en y injectant quelques chiffres plausibles pour la conduite sur autoroute. Prenons $v = 110 \text{ km/h} = 31 \text{ m/s}$, et $A = c_d A_{\text{voiture}} = 1 \text{ m}^2$. La puissance consommée par le moteur est estimée en gros à :

$4 \times \frac{1}{2} \rho A v^3 = 2 \times 1,3 \text{ kg/m}^3 \times 1 \text{ m}^2 \times (31 \text{ m/s})^3 = 80 \text{ kW}$.

Si vous conduisez la voiture à cette vitesse pendant une heure chaque jour, vous parcourrez alors 110 km et consommerez **80 kWh** d’énergie par jour. En roulant deux fois moins vite durant deux heures par jour, vous parcourrez la même distance en consommant **20 kWh** d’énergie. Ce simple modèle semble cohérent avec les chiffres de kilométrage des voitures que donne le chapitre 3. De plus, ce modèle donne aussi des indications sur la manière dont on peut réduire la quantité d’énergie consommée par votre voiture. Cependant, notre modèle a un petit nombre de défauts que nous allons détailler et corriger dans un instant.

Est-ce qu’il est possible de fabriquer une voiture qui consomme 100 fois moins d’énergie, mais qui serait toujours capable de rouler à 110 km/h ? **Non**. Pas si la voiture conserve sa forme actuelle. Sur l’autoroute, à 110 km/h, l’énergie part essentiellement dans la création de tourbillons dans l’air. Utiliser d’autres matériaux pour construire la voiture n’y changerait rien. Il faudrait un miracle pour que les moteurs à combustibles fossiles soient améliorés au point de faire passer leur rendement de 25 % à 50 %, et de réduire la consommation d’énergie des voitures à combustibles fossiles jusqu’à environ 40 kWh pour 100 km.

Les véhicules électriques ont quelques avantages : alors même que le système de stockage d’énergie, par kWh utile stocké, est à peu près 25 fois plus lourd que celui de l’essence, le poids d’un moteur électrique peut être environ 8 fois plus réduit. Et la chaîne énergétique dans une voiture électrique est considérablement plus efficace : les moteurs électriques peuvent atteindre un rendement de 90 %.

Nous reviendrons sur les voitures électriques dans de plus amples détails vers la fin de ce chapitre.

Les vélos et la question de l’échelle

Voici une question rigolote : quelle est la consommation d’énergie d’un vélo, en kWh pour 100 km ? C’est la même raison qui explique que vous

ÉNERGIE PAR UNITÉ DE DISTANCE	
Voiture à 110 km/h	$\leftrightarrow 80 \text{ kWh/100 km}$
Vélo à 21 km/h	$\leftrightarrow 2,4 \text{ kWh/100 km}$
AVIONS À 900 KM/H	
A380	27 kWh/100 places-km

TABEAU A.6. Quelques faits : la consommation d’énergie d’une voiture.

COEFFICIENTS DE PÉNÉTRATION	
VOITURES	
Honda Insight	0,25
Prius	0,26
Renault 25	0,28
Honda Civic (2006)	0,31
VW Polo GTi	0,32
Peugeot 206	0,33
Ford Sierra	0,34
Audi TT	0,35
Honda Civic (2001)	0,36
Citroën 2 CV	0,51
Cycliste	0,9
Autocar (longue distance)	0,425
AVIONS	
Cessna	0,027
Learjet	0,022
Boeing 747	0,031
SURFACES DE TRAINÉE (m²)	
Land Rover Discovery	1,6
Volvo 740	0,81
Voiture typique	0,8
Honda Civic	0,68
VW Polo GTi	0,65
Honda Insight	0,47

TABEAU A.7. Coefficients de pénétration et surfaces de trainée.

devez dépenser de l'énergie pour avancer à un bon rythme en vélo et en voiture : quand vous avancez, vous créez des tourbillons dans l'air qui vous entoure. On pourrait donc refaire tous les calculs à partir de zéro en remplaçant les chiffres de la voiture par des chiffres valables pour le vélo. Mais il y a un petit truc assez simple que l'on peut utiliser pour trouver la réponse pour le vélo à partir de la réponse pour la voiture. La quantité d'énergie consommée par une voiture, par unité de distance parcourue, est la consommation de puissance associée aux tourbillons créés dans l'air,

$$4 \times \frac{1}{2} \rho A v^3,$$

divisée par la vitesse v , ce qui fait :

$$\text{énergie par unité de distance} = 4 \times \frac{1}{2} \rho A v^2.$$

Le facteur « 4 » provient du rendement (mauvais) du moteur ; ρ est la densité de l'air ; la surface $A = c_d A_{\text{voiture}}$ est la surface frontale efficace de la voiture ; et v est sa vitesse.

Maintenant, on peut comparer le vélo avec la voiture en divisant $4 \times \frac{1}{2} \rho A v^2$ pour le vélo par $4 \times \frac{1}{2} \rho A v^2$ pour la voiture. Toutes les fractions et les ρ s'annulent, si le rendement du moteur du cycliste qui consomme du carbone est du même ordre que celui du moteur de la voiture qui consomme du carbone (ce qu'il est effectivement). Le rapport est :

$$\frac{\text{énergie par unité de distance parcourue par le vélo}}{\text{énergie par unité de distance parcourue par la voiture}} = \frac{c_d^{\text{vélo}} A_{\text{vélo}} v_{\text{vélo}}^2}{c_d^{\text{voiture}} A_{\text{voiture}} v_{\text{voiture}}^2}.$$

Le truc que nous allons utiliser s'appelle « la mise à l'échelle ». Si on connaît la manière dont évolue la consommation d'énergie en fonction de la vitesse et de la surface frontale, alors on peut facilement prédire la consommation d'énergie d'objets qui ont des vitesses et des surfaces frontales complètement différentes. En l'occurrence, supposons que le rapport entre les surfaces soit de :

$$\frac{A_{\text{vélo}}}{A_{\text{voiture}}} = \frac{1}{4}.$$

(Quatre cyclistes peuvent s'asseoir de front, épaule contre épaule, dans la largeur d'une voiture.) Supposons aussi que le vélo ne soit pas très aérodynamique :

$$\frac{c_d^{\text{vélo}}}{c_d^{\text{voiture}}} = \frac{1}{1/3}$$

Et supposons également que la vitesse du vélo soit de 21 km/h, soit :

$$\frac{v_{\text{vélo}}}{v_{\text{voiture}}} = \frac{1}{5}.$$

On a alors :

énergie par unité de distance parcourue par le vélo

énergie par unité de distance parcourue par la voiture

$=$

$=$

$=$

$\left(\frac{c_d^{\text{vélo}}}{c_d^{\text{voiture}}}\frac{A_{\text{vélo}}}{A_{\text{voiture}}}\right)\left(\frac{v_{\text{vélo}}}{v_{\text{voiture}}}\right)^2$

$=\left(\frac{3}{4}\right)\times\left(\frac{1}{5}\right)^2$

$=\frac{3}{100}$

Un cycliste qui roule à 21 km/h consomme donc environ 3 % de l’énergie par kilomètre que consomme un conducteur seul dans sa voiture sur l’autoroute — soit environ **2,4 kWh pour 100 km**.

Donc si vous voulez disposer d’un véhicule dont le rendement du carburant soit 30 fois meilleur que celui d’une voiture, c’est très simple : roulez en vélo.

Et la résistance au roulement ?

Il y a quelques petites choses que nous avons complètement ignorées jusqu’à présent : l’énergie consommée dans les pneus et la suspension de la voiture ; l’énergie qui part dans le bruit de roulement (celui des roues contre l’asphalte) ; l’énergie qui part dans les crissements de pneus et qui rape leur gomme ; et l’énergie que les véhicules dépensent pour faire trembler le sol. Quand on les prend toutes ensemble, on appelle ces formes de consommation d’énergie la *résistance au roulement*. Le modèle standard de résistance au roulement fait l’hypothèse que la force de la résistance au roulement est tout simplement proportionnelle au poids du véhicule, et qu’elle est indépendante de sa vitesse. La constante de proportionnalité est appelée le coefficient de résistance au roulement, C_{rr} . Le tableau A.8 en donne quelques valeurs typiques.

Le coefficient de résistance au roulement pour une voiture est d’environ 0,01. La résistance au roulement a juste pour effet de faire rouler en permanence la voiture dans une montée qui a une pente de un pour cent. Les frottements liés au roulement sont donc d’environ 100 newtons par tonne, quelle que soit la vitesse. Vous pouvez le vérifier en poussant une quelconque voiture d’une tonne sur une route horizontale. Une fois que vous avez réussi à la mettre en mouvement, vous verrez que vous pouvez continuer à la faire rouler d’une seule main. (100 newtons, c’est le poids de

roue	C_{rr}	TABLEAU A.8. La résistance au roulement est égale à la masse multipliée par le coefficient de résistance au roulement, C_{rr} . La résistance au roulement inclut la force due au fléchissement de la roue, aux pertes de frottement au niveau de l’axe de la roue, aux vibrations et aux tremblements à la fois du revêtement de la route et du véhicule (y compris l’énergie absorbée par les divers absorbeurs de chocs du véhicule), et au dérapage des roues sur la route ou sur les rails. Le coefficient dépend de la qualité de la route, du matériau dont la roue est faite, et de la température. Les chiffres donnés ici supposent que la route est lisse. [2bhu35]
train (acier sur acier)	0,002	
pneu de vélo	0,005	
pneus de camion en caoutchouc	0,007	
pneus de voiture en caoutchouc	0,010	

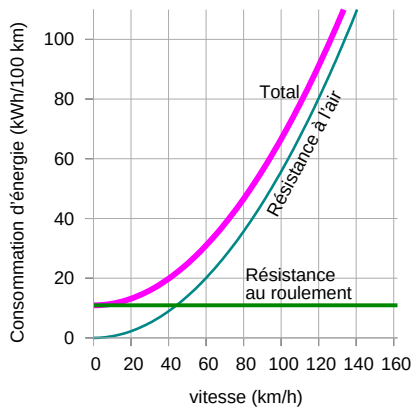


FIGURE A.9. Modèle simple de la consommation de carburant d'une voiture (énergie par unité de distance) qui roule à vitesse constante. Hypothèses : le moteur de la voiture consomme de l'énergie avec un rendement de 0,25, quelle que soit sa vitesse; $c_d A_{\text{voiture}} = 1 \text{ m}^2$; $m_{\text{voiture}} = 1\,000 \text{ kg}$; et $C_{rr} = 0,01$.

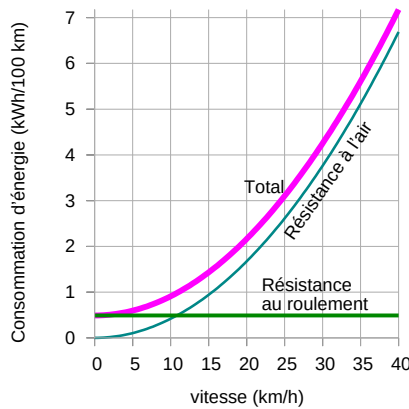


FIGURE A.10. Modèle simple de consommation de carburant d'un vélo (énergie par unité de distance). L'axe vertical représente la consommation d'énergie en kWh pour 100 km. Hypothèses : le moteur du vélo (c'est vous !) consomme de l'énergie avec un rendement de 0,25; la surface de la trainée du cycliste est de $0,75 \text{ m}^2$; la masse du cycliste et de son vélo est de 90 kg ; et $C_{rr} = 0,005$.

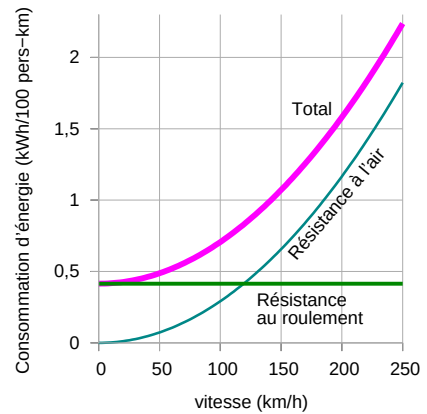


FIGURE A.11. Modèle simple de la consommation d'énergie d'un train, *par passager*, pour un train à huit voitures transportant 584 passagers. L'axe vertical représente la consommation d'énergie en kWh pour 100 pers-km. Hypothèses : le moteur du train consomme de l'énergie avec un rendement de 0,90; $c_d A_{\text{train}} = 11 \text{ m}^2$; $m_{\text{train}} = 400\,000 \text{ kg}$; et $C_{rr} = 0,002$.

100 pommes.) A une vitesse de 31 m/s , la puissance requise pour vaincre la résistance au roulement, pour un véhicule d'une tonne, est donc de :

$$\text{force} \times \text{vitesse} = (100 \text{ newtons}) \times (31 \text{ m/s}) = 3\,100 \text{ W};$$

ce qui, avec un rendement moteur de 25 %, nécessite 12 kW de puissance en entrée du moteur; tandis que la puissance nécessaire pour vaincre la trainée a été estimée en page 303 : 80 kW. Par conséquent, à vitesse élevée, environ 15 % de la puissance est requise pour vaincre la résistance au roulement.

La figure A.9 montre le modèle de la consommation de carburant (énergie par unité de distance) comme une fonction de la vitesse constante, en ajoutant la résistance de l'air et au roulement l'une à l'autre.

La vitesse à laquelle la résistance au roulement de la voiture est égale à la résistance de l'air est donnée par :

$$C_{rr} m_c g = \frac{1}{2} \rho c_d A v^2,$$

ce qui fait :

$$v = \sqrt{2 \frac{C_{rr} m_c g}{\rho c_d A}} = 13 \text{ m/s} = 47 \text{ kilomètres par heure.}$$

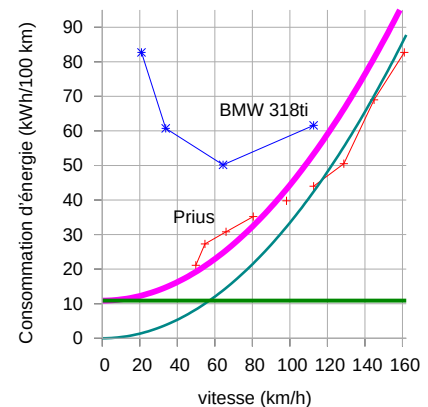


FIGURE A.12. Les consommations de carburant des voitures actuelles n'augmentent pas avec le carré de la vitesse. Les données sur la Prius proviennent de B.Z. Wilson, celles sur la BMW, de Phil C. Stuart. La ligne courbe montre ce à quoi ressemblerait quelque chose qui évolue comme le carré de la vitesse, en supposant une surface de trainée de $0,6 \text{ m}^2$.

Vélos

Pour un vélo ($m = 90$ kg, $A = 0,75$ m²), le seuil au-delà duquel la résistance de l'air devient prépondérante par rapport à la résistance au roulement se situe à une vitesse d'environ 12 km/h. A une vitesse constante de 20 km/h, le coût du pédalage est d'environ 2,2 kWh pour 100 km. En adoptant une position aérodynamique, le cycliste peut réduire sa trainée, et faire baisser sa consommation d'énergie jusqu'à environ 1,6 kWh pour 100 km.

Trains

Pour un train de 8 voitures comme celui que montre la figure 20.4 ($m = 400\,000$ kg, $A = 11$ m²), la vitesse au-dessus de laquelle la résistance de l'air est supérieure à la résistance au roulement est de :

$$v = 33 \text{ m/s} = 119 \text{ kilomètres par heure.}$$

Pour un train à une seule voiture ($m = 50\,000$ kg, $A = 11$ m²), la vitesse au-dessus de laquelle la résistance de l'air est supérieure à la résistance au roulement est de :

$$v = 12 \text{ m/s} = 42 \text{ kilomètres par heure.}$$

Lien entre puissance et vitesse

Quand je dis que diviser par deux sa vitesse au volant devrait diviser par quatre la consommation de carburant (en litres aux 100 kilomètres), certaines personnes restent sceptiques. Elles n'ont pas totalement tort : le moteur de la plupart des voitures possède un régime de fonctionnement optimal, et le choix des rapports de boîte sur la voiture fixe les vitesses minimum et maximum entre lesquelles le rendement optimal du moteur peut être atteint. Si ma suggestion de diviser par deux fait rouler la voiture en dehors de cet intervalle de vitesses, alors la consommation pourrait bien ne pas être divisée par quatre. L'hypothèse que j'ai faite implicitement, selon laquelle le rendement du moteur est le même quelles que soient la vitesse et la charge à transporter, conduit à la conclusion qu'il vaut toujours mieux (en termes de nombre de litres consommés par kilomètre) rouler moins vite. Mais si le rendement du moteur s'effondre aux basses vitesses, alors la vitesse la plus économe en énergie peut être une vitesse intermédiaire, qui est un compromis entre le fait de rouler lentement et celui de conserver un régime moteur avec un bon rendement. Dans le cas de la BMW 318ti de la figure A.12, par exemple, la vitesse optimale est d'environ 60 km/h. Mais si la société décidait que les vitesses des voitures doivent impérativement être réduites, rien n'empêcherait de concevoir différemment les moteurs et les boîtes de vitesse, de sorte que le rendement en crête du moteur soit atteint à la bonne vitesse. Comme preuve supplémentaire que

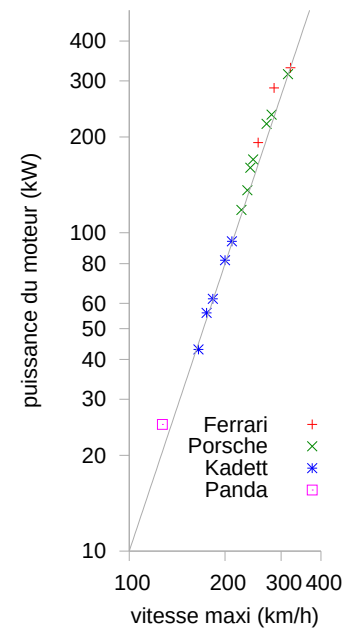


FIGURE A.13. Puissances des voitures (kW) comparées à leurs vitesses de pointe (km/h). Les deux échelles sont logarithmiques. La puissance augmente comme la puissance troisième de la vitesse : pour aller deux fois plus vite, il faut huit fois plus de puissance dans le moteur. Les données proviennent de Tennekes (1997).

la puissance dont une voiture a besoin augmente effectivement comme le cube de la vitesse, la figure A.13 montre une comparaison entre la puissance du moteur et les vitesses de pointe de toute une série de voitures. La courbe montre la relation de proportionnalité entre la puissance et v^3 .

Les voitures électriques : l'autonomie est-elle un gros problème ?

Les gens critiquent souvent l'autonomie des voitures électriques, la jugeant insuffisante. Les partisans des voitures électriques répondent régulièrement que « ce n'est pas un problème : il suffit de mettre plus de batteries » — et c'est vrai. Mais il vaudrait mieux expliciter le véritable effet des batteries supplémentaires sur la consommation d'énergie. La réponse dépend largement de la densité d'énergie que les batteries sont supposées fournir : avec une densité d'énergie de 40 Wh/kg (typique des batteries acide-plomb), nous allons voir qu'il est difficile de porter l'autonomie au-delà de 200 ou 300 km ; par contre, avec une densité d'énergie de 120 Wh/kg (typique de nombre de batteries utilisant du lithium), une autonomie de 500 km est assez facile à atteindre.

Supposons que la masse de la voiture et de ses occupants soit de 740 kg, sans aucune batterie. Nous lui ajouterons 100 kg, 200 kg, 500 kg, ou même 1 000 kg de batteries un peu plus loin. Supposons que notre voiture roule à une vitesse typique de 50 km/h ; qu'elle ait une surface de trainée de 0,8 m² ; un coefficient de résistance au roulement de 0,01 ; une distance entre deux arrêts de 500 m ; un rendement moteur de 85 % ; et qu'entre les arrêts et les redémarrages, la récupération d'énergie au freinage permette de récupérer la moitié de l'énergie cinétique de la voiture. On suppose aussi que la recharge des batteries à partir d'une prise de courant se fait avec un rendement de 85 %. La figure A.14 compare le coût du transport de la voiture et son autonomie, en fonction de la quantité de batteries installées à bord. La partie supérieure de la courbe (en bleu) montre le résultat pour une batterie dont la densité d'énergie est de 40 Wh/kg (bonnes vieilles batteries acide-plomb). L'autonomie est limitée par un mur qui se situe un peu au-dessus de 500 km. Pour s'approcher de cette autonomie maximum, il faut emporter une quantité de batteries délirante : par exemple, pour atteindre une autonomie de 400 km, il faut 2 000 kg de batteries, et le coût de transport dépasse 25 kWh pour 100 km. Par contre, si on se contente d'une autonomie de 180 km, alors on peut s'en sortir avec 500 kg de batteries. La partie inférieure de la courbe de la figure A.14 (en rouge) montre que les choses vont nettement mieux si on passe à la technologie des batteries lithium-ion, bien plus légères. Avec une densité d'énergie de 120 Wh/kg, les voitures électriques embarquant 500 kg de batteries peuvent facilement atteindre une autonomie de 500 km. Le coût du transport prévue est alors d'environ 13 kWh pour 100 km.

Il me semble donc que le problème de l'autonomie des voitures électriques a déjà été résolu par l'arrivée des batteries modernes. Bien sûr, ce

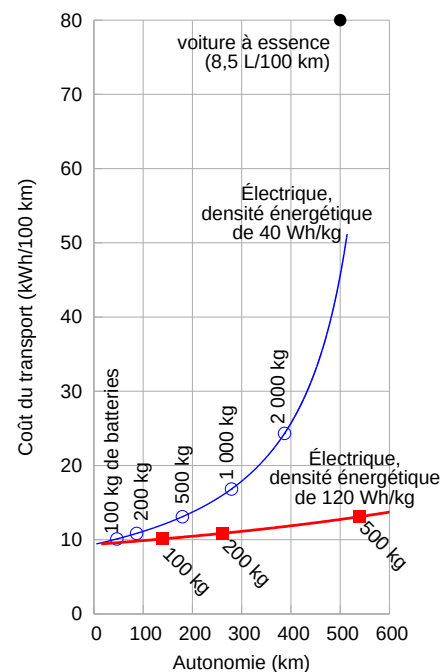


FIGURE A.14. Modèle de l'autonomie des voitures électriques (axe horizontal) et du coût du transport (axe vertical) comme une fonction du poids de batteries, pour deux technologies de batteries. Une voiture avec 500 kg de vieilles batteries avec une densité d'énergie de 40 Wh par kg, a une autonomie de 180 km. Avec le même poids de batteries modernes, fournissant 120 Wh par kg, une voiture électrique peut atteindre une autonomie supérieure à 500 km. Les deux voitures auraient un coût énergétique d'environ 13 kWh pour 100 km. Ces chiffres supposent un rendement de charge de batterie d'environ 85 %.

serait encore mieux si on disposait de batteries encore meilleures. Mais une densité d'énergie de 120 Wh par kg est déjà suffisante si on accepte d'avoir jusqu'à 500 kg de batteries dans la voiture. En pratique, j'imagine que la plupart des gens se satisferaient même d'une autonomie de 300 km, qu'offrent 250 kg de batteries. Si ces batteries étaient divisées en dix blocs de 25 kg que l'on peut débrancher séparément, alors l'utilisateur d'une voiture pourrait se contenter de conserver quatre de ces dix blocs à bord lors de ses trajets quotidiens entre travail et domicile (100 kg permettent une autonomie de 140 km) ; et il pourrait se procurer six blocs supplémentaires dans une station de recharge de batteries lorsqu'il voudrait faire de plus longs voyages. Lors de ces longs voyages, il pourrait alors échanger ses batteries vides contre un ensemble de batteries pleines à une station d'échange de batteries, à peu près tous les 300 km.

Notes et bibliographie

Page n°

- 303 *Les voitures à essence typiques ont un rendement d'environ 25 %.* L'encyclopédie Encarta [6by8x] précise que « le rendement d'un bon moteur moderne à cycle Otto varie entre 20 et 25 % ». Le moteur à essence d'une Toyota Prius, célèbre pour avoir un des moteurs de voiture les plus efficaces, utilise un cycle Atkinson au lieu du cycle Otto ; la puissance-crête qu'il génère est de 52 kW (70 chevaux) et son rendement est de 34 % lorsqu'il fournit 10 kW [348whs]. Le moteur Diesel le plus efficace au monde a un rendement de 52 %, mais il n'est pas vraiment utilisable dans une voiture : il pèse 2 300 tonnes. Le moteur turbo-Diesel Wartsila-Sulzer RTA96-C (figure A.15) est destiné aux navires porte-conteneurs, et la puissance qu'il développe est de 80 MW.
- 302 *La récupération d'énergie au freinage divise en gros par deux l'énergie perdue lorsque la voiture freine.* Source : E4tech (2007).
- 303 *Les moteurs électriques peuvent être environ 8 fois plus petits que les moteurs à essence.* Un moteur 4-temps à essence a un rapport puissance/poids d'environ 0,75 kW/kg. Les meilleurs moteurs électriques ont un rendement de 90 %, et un rapport puissance/poids de 6 kW/kg. Remplacer un moteur à essence de 75 kW par un moteur électrique de même puissance économise 85 kg. Malheureusement, le rapport puissance/poids des batteries est d'environ 1 kW par kg ; donc ce que le véhicule électrique gagne sur le moteur, il le perd avec les batteries.
- 306 *Le moteur du vélo consomme de l'énergie avec un rendement de 0,25.* Cette hypothèse faite sur le vélo, ainsi que toutes les autres, sont confirmées par di Prampero et al. (1979). La surface de trainée d'un cycliste en position de course est de $c_d A = 0,3 \text{ m}^2$. La résistance au roulement d'un cycliste sur un vélo de course de très bonne qualité (poids total : 73 kg) est de 3,2 N.
- *Figure A.12.*
Les données sur la Prius proviennent de B. Z. Wilson [home.hiwaay.net/~bzwilson/prius/]. Les données sur la BMW proviennent de Phil C. Stuart [www.randomuseless.info/318ti/economy.html].



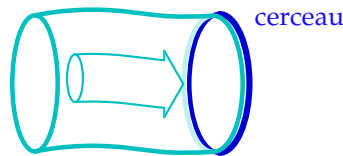
FIGURE A.15. Le moteur Diesel 2-temps Wartsila-Sulzer RTA96-C et ses 14 cylindres. Il fait 27 mètres de long et 13,5 mètres de haut.
www.wartsila.com

Pour en savoir plus : Gabrielli et von Kármán (1950).

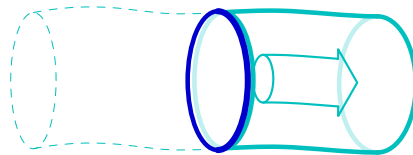
B Vent II

La physique de l'éolien

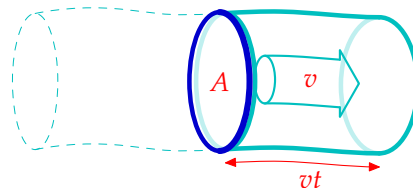
Pour estimer l'énergie qui se trouve dans le vent, imaginons que l'on tienne en l'air, face au vent, un cerceau de surface intérieure A qui a pour vitesse v . Considérons la masse d'air qui passe à travers notre cerceau durant une seconde. Voici un schéma de cette masse d'air juste avant qu'elle passe à travers le cerceau :



Et voici un schéma de cette même masse d'air une seconde plus tard :



La masse de ce volume d'air est le produit de sa densité ρ , de sa surface A , et de sa longueur, qui vaut v fois t , où t est une durée d'une seconde.



L'énergie cinétique de ce volume d'air est égale à :

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}\rho Avt v^2 = \frac{1}{2}\rho Atv^3. \tag{B.1}$$

La puissance du vent, pour une surface A — c'est-à-dire l'énergie cinétique de l'air qui traverse cette surface par unité de temps — vaut donc :

$$\frac{\frac{1}{2}mv^2}{t} = \frac{1}{2}\rho Av^3. \tag{B.2}$$

Cette formule vous paraît peut-être familière — nous avons obtenu une expression identique en page 301, lorsque nous avons discuté des besoins de puissance d'une voiture en mouvement.



J'utilise à nouveau cette formule :
masse = densité $\times$ volume

nœuds	km/h	m/s	Échelle Beaufort
1,9	3,6	1	force 1
6	11	3	force 2
10	18	5	force 3
12	21	6	force 4
14	25	7	
19	36	10	force 5
25	47	13	force 6
31	58	16	force 7
37	68	19	force 8
43	79	22	force 9
52	97	27	force 10
60	112	31	force 11
68	126	35	force 12

FIGURE B.1. Vitesses.

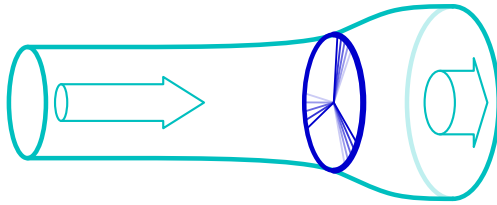


FIGURE B.2. Flux d'air à travers les pales d'une éolienne. L'air est ralenti par la turbine et se disperse en s'évasant.

Quelle est la vitesse typique du vent ? Un jour venteux, un cycliste remarque aisément la direction du vent : avec le vent dans le dos, on peut rouler bien plus vite que d'habitude. La vitesse de ce vent est, par conséquent, du même ordre que la vitesse typique d'un cycliste, qui est, mettons, de 21 kilomètres par heure (6 mètres par seconde). Même si, à Cambridge, le vent est rarement aussi fort, prenons quand même cette valeur comme vitesse de vent typique pour la Grande-Bretagne (et gardons en tête qu'il nous faudra probablement revoir cette estimation).

La densité de l'air est d'environ 1,3 kg par m³. (D'habitude, j'arrondis cette valeur à 1 kg par m³, qui est plus facile à retenir, mais je ne l'ai pas fait ici.) La puissance typique du vent par mètre carré de cerceau est alors :

$$\frac{1}{2}\rho v^3 = \frac{1}{2} \times 1,3 \text{ kg/m}^3 \times (6 \text{ m/s})^3 = 140 \text{ W/m}^2. \quad (\text{B.3})$$

Toute cette énergie ne peut pas être extraite par une éolienne. La turbine ralentit fortement l'air, mais il lui faut quand même laisser *un peu* d'énergie cinétique à cet air ; sinon, cet air arrêté bloquerait le passage. La figure B.2 indique de manière schématisée ce qu'il advient effectivement du flux d'air derrière la turbine. La fraction maximum de l'énergie entrante qui peut être extraite par une turbine circulaire a été déterminée par un physicien allemand, Albert Betz, en 1919. Si la turbine divise par trois la vitesse du vent qui la traverse, la puissance extraite par la turbine est égale à 16/27 de la puissance totale du vent entrant. 16/27, cela fait 0,59. Concrètement, on va supposer que l'éolienne a un rendement de 50 %. Ceci dit, dans la réalité, les éoliennes sont conçues pour certaines vitesses de vent ; si la vitesse du vent est nettement plus élevée que la vitesse idéale de la turbine, il faut la débrancher.

Comme exemple, supposons que la turbine ait un diamètre $d = 25$ mètres, et un mât d'une hauteur de 32 mètres, qui correspond en gros à la taille de l'éolienne solitaire au dessus de Wellington, en Nouvelle-Zélande (figure B.3). La puissance d'une seule éolienne est alors de :

$$\begin{aligned} & \text{facteur de rendement} \times \text{puissance par unité de surface} \times \text{surface} \\ &= 50 \% \times \frac{1}{2}\rho v^3 \times \frac{\pi}{4}d^2 \end{aligned} \quad (\text{B.4})$$

$$= 50 \% \times 140 \text{ W/m}^2 \times \frac{\pi}{4}(25 \text{ m})^2 \quad (\text{B.5})$$

$$= 34 \text{ kW}. \quad (\text{B.6})$$



FIGURE B.3. L'éolienne de Brooklyn au dessus de Wellington, en Nouvelle-Zélande, avec quelques personnes à son pied pour donner l'échelle. Un jour de vent, cette éolienne produit 60 kW (soit 1 400 kWh par jour). Photo par Philip Banks.

Et effectivement, lorsque j’ai visité cette éolienne un jour de bon vent, son wattmètre indiquait qu’elle générait 60 kW.

Pour estimer combien de puissance on peut tirer du vent, il nous faut décider quelle taille vont avoir nos éoliennes, et à quelle distance nous pouvons les placer les unes des autres.

Jusqu’à quelle densité peut-on planter des éoliennes ? Trop proches les une des autres, les éoliennes directement au vent dévient les éoliennes placées en aval. Selon les experts, les éoliennes ne peuvent pas être rapprochées de plus de 5 fois leur diamètre sans qu’apparaissent des pertes significatives de puissance. Avec un tel espacement, la puissance que les éoliennes peuvent générer par unité de surface de terrain est de :

$$\frac{\text{puissance par éolienne (B.4)}}{\text{surface de terrain par éolienne}} = \frac{\frac{1}{2}\rho v^3 \frac{\pi}{8} d^2}{(5d)^2} \tag{B.7}$$

$$= \frac{\pi}{200} \times \frac{1}{2} \rho v^3 \tag{B.8}$$

$$= 0,016 \times 140 \text{ W/m}^2 \tag{B.9}$$

$$= 2,2 \text{ W/m}^2. \tag{B.10}$$

Ce chiffre mérite d’être gardé à l’esprit : une ferme éolienne avec une vitesse de vent de 6 m/s produit une puissance de 2 W/m² de terrain. Remarquez que notre réponse ne dépend pas du diamètre de la turbine. Les *ds* s’annulent parce que si l’on installe des éoliennes plus grandes, il faut plus les espacer. De plus grandes éoliennes, cela peut être une bonne idée pour attraper les vents plus forts que l’on rencontre en s’éloignant du sol (plus une éolienne est haute, plus la vitesse du vent qu’elle rencontre est élevée), ou pour générer des économies d’échelle. Mais il n’y a pas d’autre raison valable pour préférer de grandes éoliennes.

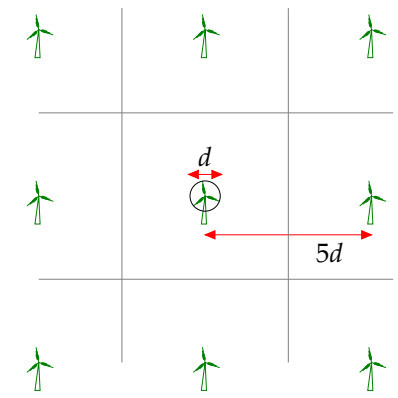
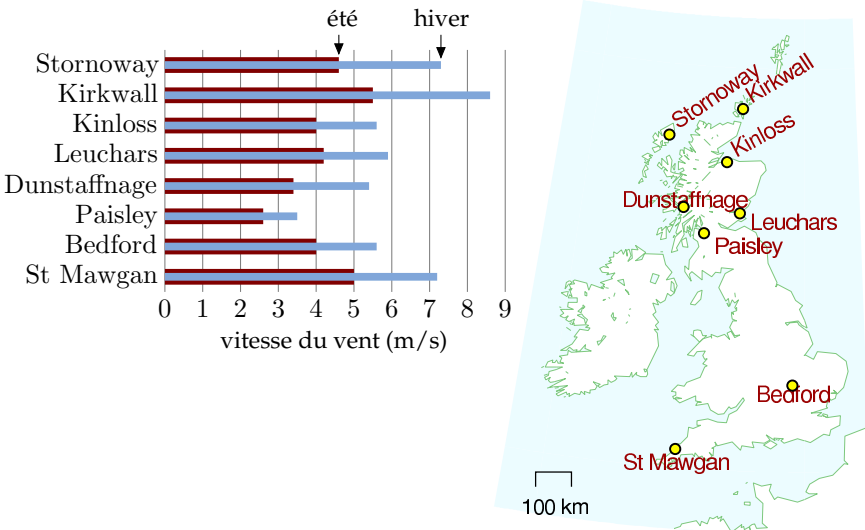


FIGURE B.4. Disposition d’une ferme éolienne.

PUissance par unité de surface	
ferme éolienne (vitesse 6 m/s)	2 W/m ²

TABLEAU B.5. Données à retenir : les fermes éoliennes.

FIGURE B.6. Vitesse moyenne du vent en été (barres sombres) et en hiver (barres claires) sur huit sites répartis sur le territoire de la Grande-Bretagne. Les vitesses ont été mesurées à la hauteur standard du météorologiste, soit 10 mètres. Les moyennes sont calculées sur la période 1971–2000.

Par contre, ce calcul est très largement dépendant de notre estimation de la vitesse du vent. Une vitesse de 6 m/s est-elle une estimation réaliste des vitesses de vent typiques et à long terme dans les zones venteuses de Grande-Bretagne ? Les figures 4.1 et 4.2 montraient les vitesses de vent mesurées à Cambridge et Cairngorm. La figure B.6 montre les vitesses de vent estivale et hivernale moyennes en huit autres points de la Grande-Bretagne. Je crains que pour l'essentiel de la Grande-Bretagne, 6 m/s sur-estime la vitesse du vent typique ! Si, au lieu de 6 m/s, on prend la vitesse moyenne à Bedford, soit 4 m/s, comme estimation de la vitesse du vent, il nous faut revoir notre évaluation à la baisse, en la multipliant par $(4/6)^3 \simeq 0,3$. (Souvenez-vous, la puissance du vent varie comme le cube de la vitesse du vent.) D'un autre côté, pour estimer la puissance typique, plutôt que de prendre le cube de la vitesse moyenne du vent, on devrait plutôt prendre la moyenne du cube de la vitesse du vent : la moyenne du cube est supérieure au cube de la moyenne. Mais si on commence à aller jusqu'à ce niveau de détails, les choses deviennent encore plus compliquées, parce qu'en réalité, les turbines d'éoliennes ne génèrent pas une puissance proportionnelle au cube de la vitesse du vent. Il existe un intervalle de vitesses de vent à l'intérieur duquel elles génèrent la puissance idéale. Si la vitesse du vent n'est pas dans cet intervalle (plus faible ou plus élevée), alors elles génèrent moins que la puissance idéale.

Variations de la vitesse du vent selon la hauteur

Des éoliennes plus hautes rencontrent des vents avec des vitesses plus élevées. La manière dont la vitesse du vent augmente avec la hauteur est compliquée : elle dépend de la « du terrain alentour et de l'heure de la journée. A titre approximatif, on peut considérer qu'en multipliant par deux la hauteur, on augmente typiquement la vitesse du vent de 10 %, et donc sa puissance de 30 %.

Voici un certain nombre de formules standard qui définissent la vitesse v comme une fonction de la hauteur z :

1. Selon la formule du NREL [yat7uk], la vitesse varie comme une puissance de la hauteur :

$$v(z) = v_{10} \left(\frac{z}{10 \text{ m}} \right)^\alpha,$$

où v_{10} est la vitesse du vent à 10 mètres du sol, et où une valeur typique de l'exposant α est 0,143 ou $1/7$. La loi en un-septième ($v(z)$ est proportionnel à $z^{1/7}$) est utilisée par Elliott et al. (1991), par exemple.

2. La formule de la *Danish Wind Industry Association* [yaoonz] est la suivante :

$$v(z) = v_{\text{ref}} \frac{\log(z/z_0)}{\log(z_{\text{ref}}/z_0)},$$

où z_0 est un paramètre appelé longueur de rugosité, et v_{ref} est la vitesse à une hauteur de référence z_{ref} qui peut être 10 mètres. La

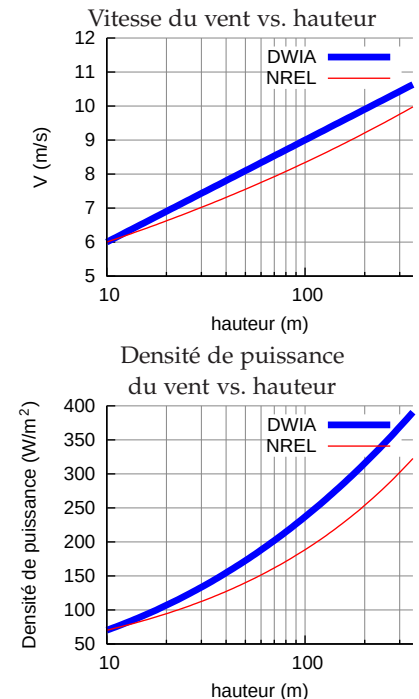


FIGURE B.7. En haut : Deux modèles de vitesses du vent en fonction de la hauteur. DWIA = *Danish Wind Industry Association* (Association de l'industrie éolienne Danoise) ; NREL = *National Renewable Energy Laboratory* (Laboratoire national des énergies renouvelables). Pour chaque modèle, la vitesse à 10 mètres a été fixée à 6 m/s. Pour le modèle danois, la longueur de rugosité est fixée à $z_0 = 0,1$ mètre. En bas : La densité de puissance (c'est-à-dire la puissance par unité de surface verticale) selon chacun de ces modèles.



FIGURE B.8. La qr5 de quietrevolution.co.uk. Pas exactement une éolienne typique.

longueur de rugosité pour une campagne typique (terres agricoles avec quelques maisons et quelques haies protectrices, espacées d'environ 500 mètres — « rugosité de classe 2 ») est de $z_0 = 0,1$ mètre.

En pratique, ces deux formules de vitesse de vent donnent des résultats numériques similaires. Ce qui ne veut pas dire, cependant, qu'elles sont toujours valables. Van den Berg (2004) suggère que les vents qui soufflent la nuit ont souvent des profils différents.

Caractéristiques standard des éoliennes

Aujourd'hui, une turbine typique a un diamètre de rotor d'environ 54 mètres dont le centre est situé à une hauteur de 80 mètres ; une telle machine a une « capacité » de 1 MW. La « capacité » ou « puissance-crête » est la puissance *maximum* que la turbine peut générer dans des conditions optimales. Habituellement, les turbines éoliennes sont conçues pour commencer à tourner avec des vitesses de vent comprises entre 3 et 5 m/s, et pour s'arrêter si la vitesse du vent atteint 25 m/s (force 10, « avis de tempête » chez les marins). La puissance moyenne réellement délivrée est la « capacité » multipliée par un facteur qui décrit la fraction du temps pendant lequel les conditions de vent sont proches des conditions optimales. Ce facteur, parfois appelé « facteur de charge » ou « facteur de capacité », dépend du site choisi ; un facteur de charge typique pour un *bon* site au Royaume-Uni est de 30 %. Aux Pays-Bas, le facteur de charge typique est de 22 % ; en Allemagne, il est de 19 %.

Estimations de la densité de puissance des fermes éoliennes, faites par d'autres personnes

Dans l'étude gouvernementale [www.world-nuclear.org/policy/DTI-PIU.pdf], la ressource de vent terrestre du Royaume-Uni, en puissance éolienne par unité de surface, est estimée à 9 W/m^2 tout au plus (en termes de capacité, pas de production moyenne). Si le facteur de capacité est de 33 %, alors la puissance moyenne produite serait de 3 W/m^2 .

Le *London Array* est une ferme éolienne en mer en cours de construction au large de l'estuaire de la Tamise. Avec sa capacité de 1 GW, il est prévu qu'elle devienne la ferme éolienne marine la plus grande au monde. Une fois terminée, cette ferme éolienne sera composée de 271 éoliennes couvrant 245 km² [6o86ec], et elle fournira une puissance moyenne de 3 100 GWh par an (350 MW). (Pour un coût d'1,8 milliard d'euros.) Cela fait une puissance par unité de surface de $350 \text{ MW} / 245 \text{ km}^2 = 1,4 \text{ W/m}^2$. C'est moins que d'autres fermes éoliennes en mer parce que, je présume, le site inclut un grand chenal (le *Knock Deep*) qui est trop profond (environ 20 mètres) pour que l'installation d'éoliennes y soit économiquement rentable.

L'impact qu'auront ces projets [de construction du London Array] sur le paysage et sur notre style de vie m'inquiète plus que je ne l'ai jamais été d'une invasion nazie sur nos côtes.

Bill Boggia, de Graveney, où les câbles sous-marins de la ferme éolienne vont émerger sur la terre ferme.

Interrogations

Et la micro-génération ? Si vous plantez une de ces mini-turbines sur votre toit, quelle quantité d'énergie pouvez-vous espérer obtenir ?

En prenant comme hypothèse une vitesse de vent de 6 m/s, ce qui, comme nous l'avons vu précédemment, se situe *au-dessus* de la vitesse moyenne de vent sur l'essentiel du territoire britannique, et en supposant que l'éolienne a un diamètre de 1 mètre, la puissance délivrée sera de 50 W. Cela fait 1,3 kWh par jour — autrement dit, pas beaucoup. Et en réalité, sur un site urbain typique en Angleterre, une micro-turbine ne fournit que 0,2 kWh par jour — voir page 78.

Les pires éoliennes au monde sont peut-être celles situées dans la ville de Tsukuba, au Japon : elles consomment plus de puissance qu'elles n'en génèrent. Leurs installateurs étaient tellement embarrassés par ces turbines immobiles, qu'ils ont préféré importer de la puissance pour les faire tourner et faire croire ainsi qu'elles fonctionnaient ! [6bkvbn]



FIGURE B.9. Une micro-turbine Ampair de « 600 W ». La puissance moyenne générée par cette micro-turbine installée à Leamington Spa est de 0,037 kWh par jour (1,5 W).

Notes et bibliographie

Page n°

- 312 *La fraction maximum de l'énergie entrante qui peut être extraite par une turbine circulaire...* Le site Web de la Danish Wind Industry Association en donne une bonne explication. [yekdaa].
- 314 *où z_0 est un paramètre appelé longueur de rugosité.* Le projet francophone Wiki Eolienne donne une description assez détaillée de la notion de rugosité [6ey1xaj].
- 315 *Habituellement, les turbines éoliennes sont conçues pour commencer à tourner avec des vitesses de vent comprises entre 3 et 5 m/s.* [ymfbsn].

- *un facteur de charge typique pour un bon site est de 30 %*. En 2005, le facteur de charge moyen de l'ensemble des grandes fermes éoliennes du Royaume-Uni était de 28 % [ypvbvd]. Le facteur de charge n'est pas le même selon le moment de l'année, avec un minimum à 17 % en juin et juillet. Le facteur de charge de la zone la plus productive du pays — Caithness, les îles Orcades et les Shetlands — était de 33 %. Les facteurs de charge des deux fermes éoliennes en mer qui étaient en exploitation en 2005 étaient de 36 % pour North Hoyle (au large du Pays de Galles du Nord), et de 29 % pour Scroby Sands (au large de Great Yarmouth). Les facteurs de charge moyens en 2006 pour dix régions étaient de : Cornouailles, 25 % ; milieu du Pays de Galles, 27 % ; Cambridgeshire et Norfolk, 25 % ; Cumbria, 25 % ; Durham, 16 % ; sud de l'Écosse, 28 % ; îles Orcades et Shetlands, 35 % ; nord-est de l'Écosse, 26 % ; Irlande du nord, 31 % ; éoliennes en mer, 29 %. [wbd8o]

Watson et al. (2002) indique qu'une vitesse de vent moyenne annuelle minimale de 7,0 m/s est actuellement considérée comme nécessaire pour qu'un projet de production de puissance éolienne puisse être commercialement viable. Au Royaume-Uni, environ 33 % du territoire connaît de telles vitesses de vent.



FIGURE B.10. Une turbine Iskra de 5,5 mètres de diamètre et de 5 kW de puissance [www.iskrawind.com], subissant son contrôle annuel. Cette turbine, située dans le Hertfordshire (pas vraiment la région la plus ventée de Grande-Bretagne), installée à une hauteur de 12 mètres, génère en moyenne 11 kWh par jour. Une ferme éolienne composée de machines ayant cette performance, avec une éolienne installée pour chaque carré de terrain de 30 mètres de côté, aurait une puissance par unité de surface de 0,5 W/m².

C *Avions II*

Ce que nous devons faire, c'est chercher comment rendre les voyages aériens plus économes en énergie, et développer de nouveaux carburants pour consommer moins d'énergie et émettre moins de CO₂.

Tony Blair

Espérer que les choses iront pour le mieux n'est pas une stratégie, c'est une illusion.

Emily Armistead, Greenpeace

Quelles sont les limites fondamentales des voyages par la voie des airs ? La physique du vol exige-t-elle la consommation inévitable d'une certaine quantité d'énergie, par tonne, par kilomètre parcouru ? Jusqu'à quelle distance maximale un Boeing 747 de 300 tonnes peut-il voler ? Qu'en est-il pour une barge rousse de 1 kg ou une sterne arctique de 100 g ?

Tout comme le chapitre 3, dans lequel nous avons estimé la consommation des voitures, était suivi du chapitre A, qui modélise comment les voitures consomment cette énergie, ce chapitre complète le chapitre 5, et examine où part l'énergie consommée par les avions. Les seules notions de physique requises sont les lois de Newton sur le mouvement, que je décrirai quand nous en aurons besoin.

Cette discussion nous permettra de répondre à des questions telles que « les voyages aériens consommeraient-ils moins d'énergie avec des avions à hélices plus lents ? » Il y aura plein d'équations : j'espère que vous les aimez !

Comment voler dans les airs

Les avions (et les oiseaux) se déplacent dans de l'air. Tout comme les voitures et les trains, ils subissent donc une force de friction (appelée « traînée »), et une bonne partie de l'énergie engloutie par un avion sert à propulser l'avion contre cette force. De plus, et contrairement aux voitures ou aux trains, les avions dépensent de l'énergie *pour rester en l'air*.

Les avions restent en l'air en envoyant de l'air vers le bas. Quand l'avion pousse l'air vers le bas, l'air pousse l'avion vers le haut (parce que c'est ce que la troisième loi de Newton lui dit de faire). Tant que cette poussée vers le haut, qui est qualifiée de portance, est assez élevée pour compenser le poids de l'appareil qui l'attire vers le bas, l'avion reste en l'air.

Quand l'avion rejette de l'air vers le bas, il donne à cet air de l'énergie cinétique. Créer de la portance exige donc de l'énergie. La puissance totale dont l'avion a besoin est la somme de la puissance requise pour générer la portance, et de la puissance requise pour compenser la traînée ordinaire. (Soit dit en passant, la puissance requise pour générer la portance est sou-



FIGURE C.1. Quelques oiseaux : deux sternes arctiques, une barge rousse, et un Boeing 747.

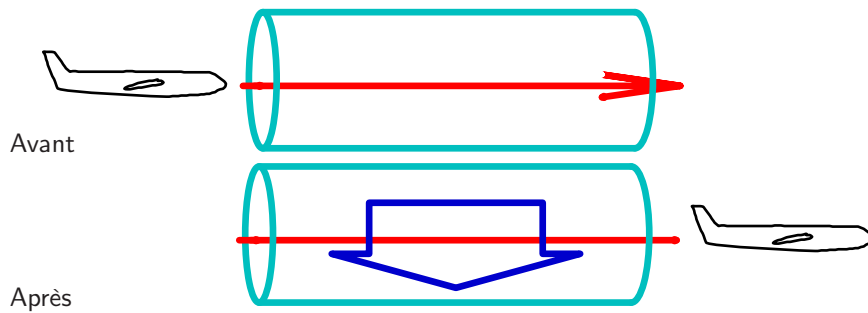


FIGURE C.2. Un avion rencontre un tube d'air stationnaire. Une fois l'avion passé, l'air a été envoyé vers le bas par l'avion. La force exercée par l'avion sur l'air pour l'accélérer vers le bas est égale et opposée à la force exercée sur l'avion par l'air.

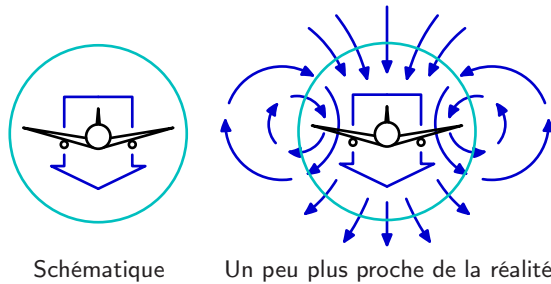


FIGURE C.3. Notre schéma considère que l'avion laisse une saucisse d'air en mouvement vers le bas dans son sillage. Une représentation plus réaliste implique un flux tourbillonnant complexe. Pour le voir en vrai, regardez la figure C.4.

vent appelée « traînée induite ». Mais je l'appellerai puissance de portance, P_{portance} .)

Les deux équations dont nous aurons besoin pour construire une théorie du vol aérien, sont la seconde loi de Newton :

$$\text{force} = \text{taux de variation de la quantité de mouvement}, \quad (\text{C.1})$$

et la troisième loi de Newton, que je viens juste de mentionner :

$$\text{force exercée par A sur B} = - \text{force exercée par B sur A}. \quad (\text{C.2})$$

Si vous n'aimez pas les équations, je peux en vous donner dès maintenant la conclusion : nous allons établir que la puissance requise pour générer la portance est *égale* à la puissance requise pour compenser la traînée. Donc le fait de devoir « rester en l'air » *multiplie par deux* la puissance nécessaire.

Faisons un schéma de la force de portance agissant sur un avion se déplaçant à la vitesse v . Pendant l'intervalle de temps t , l'avion parcourt la distance vt et laisse derrière lui une saucisse d'air se déplaçant vers le bas (figure C.2). Nous appellerons A_s la surface de la section transversale de cette saucisse. Le diamètre de cette saucisse est à peu près égal à l'envergure w de l'avion. (A l'intérieur de cette grande saucisse on trouve une plus petite saucisse d'air turbulent correspondant à la surface frontale du corps de l'avion.) En réalité, les détails du flux d'air sont beaucoup plus intéressants que cette représentation en saucisse : l'extrémité de chaque aile laisse derrière elle un tourbillon, l'air entre les extrémités d'aile se déplace rapidement vers le bas, tandis que l'air au-delà des extrémités d'aile

(à l'extérieur) se déplace vers le haut (figures C.3 et C.4). Cet air qui monte est exploité par les oiseaux qui volent en formation : juste après la pointe d'une aile d'oiseau, on trouve un léger courant ascendant. Mais revenons à notre saucisse.

La masse de la saucisse est de :

$$m_{\text{saucisse}} = \text{densité} \times \text{volume} = \rho v t A_s. \quad (\text{C.3})$$

Mettons que la saucisse tout entière se déplace vers le bas à la vitesse u , et calculons la valeur de u pour laquelle l'avion subit une force de portance égale à son poids mg . La quantité de mouvement créée vers le bas de la saucisse pendant l'intervalle t est de :

$$\text{masse} \times \text{vitesse} = m_{\text{saucisse}} u = \rho v t A_s u. \quad (\text{C.4})$$

Et d'après les lois de Newton, ceci doit être égal à la quantité de mouvement induite par le poids de l'avion pendant le temps t , à savoir :

$$mgt. \quad (\text{C.5})$$

A partir de cette équation,

$$\rho v t A_s u = mgt, \quad (\text{C.6})$$

nous pouvons déduire la vitesse requise de la saucisse :

$$u = \frac{mg}{\rho v A_s}.$$

Intéressant ! La vitesse de la saucisse est *inversement* proportionnelle à la vitesse v de l'avion. Un avion qui va lentement doit renvoyer de l'air vers le bas plus vigoureusement qu'un avion rapide, parce qu'il rencontre moins d'air par unité de temps. C'est la raison pour laquelle les avions doivent déployer leurs volets lors de l'atterrissage : allant lentement, il leur faut une aile plus large et plus pentue pour dévier plus d'air.

Quel est le coût énergétique pour envoyer la saucisse vers la bas à la vitesse u ? L'énergie requise est de :

$$P_{\text{portance}} = \frac{\text{énergie cinétique de la saucisse}}{\text{durée}} \quad (\text{C.7})$$

$$= \frac{1}{t} \frac{1}{2} m_{\text{saucisse}} u^2 \quad (\text{C.8})$$

$$= \frac{1}{2t} \rho v t A_s \left(\frac{mg}{\rho v A_s} \right)^2 \quad (\text{C.9})$$

$$= \frac{1}{2} \frac{(mg)^2}{\rho v A_s}. \quad (\text{C.10})$$

La puissance totale nécessaire pour que l'avion avance est la somme de la puissance de traînée et de la puissance de portance :

$$P_{\text{totale}} = P_{\text{trainée}} + P_{\text{portance}} \quad (\text{C.11})$$

$$= \frac{1}{2} c_d \rho A_p v^3 + \frac{1}{2} \frac{(mg)^2}{\rho v A_s}, \quad (\text{C.12})$$



FIGURE C.4. Les flux d'air dans le sillage d'un avion. Photo du Langley Research Center de la NASA.

où A_p est la surface frontale de l'avion et c_d est son coefficient de pénétration dans l'air (comme dans le chapitre A).

Le rendement de l'avion, exprimé comme la quantité d'énergie consommée par unité de distance parcourue, serait égal à :

$$\left. \frac{\text{énergie}}{\text{distance}} \right|_{\text{idéale}} = \frac{P_{\text{totale}}}{v} = \frac{1}{2} c_d \rho A_p v^2 + \frac{1}{2} \frac{(mg)^2}{\rho v^2 A_s}, \quad (\text{C.13})$$

si l'avion transformait l'énergie de son carburant en puissance de traînée et en puissance de portance de façon parfaitement efficace. (Soit dit en passant, un autre nom pour « énergie par unité de distance parcourue » est la « force », et l'on peut interpréter les deux termes ci-dessus comme la force de traînée $\frac{1}{2} c_d \rho A_p v^2$ et la force liée à la portance $\frac{1}{2} \frac{(mg)^2}{\rho v^2 A_s}$. Leur somme est la force, appelée « poussée », qui correspond précisément à l'effort que doivent fournir les moteurs.)

Dans la réalité, les réacteurs ont un rendement d'environ $\epsilon = 1/3$, et donc l'énergie par unité de distance d'un avion se déplaçant à la vitesse v est de :

$$\frac{\text{énergie}}{\text{distance}} = \frac{1}{\epsilon} \left(\frac{1}{2} c_d \rho A_p v^2 + \frac{1}{2} \frac{(mg)^2}{\rho v^2 A_s} \right). \quad (\text{C.14})$$

Cette expression de l'énergie par unité de distance est assez compliquée. Mais elle peut largement se simplifier si l'on suppose que l'avion est *conçu* pour voler à la vitesse qui *minimise* l'énergie par unité de distance. Car, voyez-vous, on constate qu'il existe une valeur de v minimisant l'énergie par unité de distance (figure C.5). La somme des deux quantités $\frac{1}{2} c_d \rho A_p v^2$ et $\frac{1}{2} \frac{(mg)^2}{\rho v^2 A_s}$ est minimale quand ces deux valeurs sont égales. Ce phénomène est délicieusement récurrent en physique et en ingénierie : deux choses qui, a priori, n'ont pas de *raison* d'être égales, *s'avèrent* finalement *être* égales, ou égales à un facteur deux près.

Ce principe d'égalité nous dit donc que la vitesse optimale pour l'avion est telle que :

$$c_d \rho A_p v^2 = \frac{(mg)^2}{\rho v^2 A_s}, \quad (\text{C.15})$$

soit :

$$\rho v_{\text{opt}}^2 = \frac{mg}{\sqrt{c_d A_p A_s}}, \quad (\text{C.16})$$

Ceci définit la vitesse optimale si notre représentation schématique du vol aérien est fidèle ; ce schéma ne l'est plus si le rendement du moteur ϵ varie de façon significative en fonction de la vitesse, ou si la vitesse de l'avion dépasse la vitesse du son (330 m/s) ; au delà de la vitesse du son, il nous faut un modèle différent pour la traînée et la portance.

Testons notre modèle en regardant la vitesse optimale prédite pour un 747 et pour un albatros. Nous devons faire attention à prendre la bonne valeur pour la densité de l'air : si nous voulons estimer la vitesse de croisière

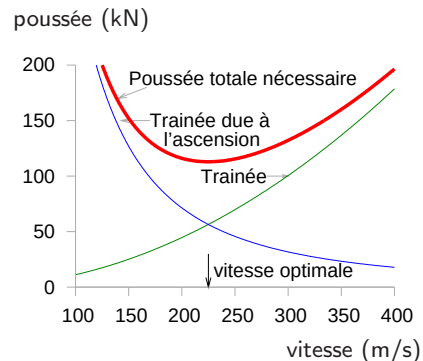


FIGURE C.5. La force requise pour qu'un avion se déplace, en fonction de sa vitesse v , est la somme d'une force de traînée ordinaire $\frac{1}{2} c_d \rho A_p v^2$ — laquelle augmente avec la vitesse — et de la force liée à la portance (aussi connue sous le nom de traînée induite) $\frac{1}{2} \frac{(mg)^2}{\rho v^2 A_s}$ — laquelle décroît avec la vitesse. Il y a une vitesse idéale, v_{optimale} , pour laquelle la force requise est minimale. Une force représente de l'énergie par unité de distance, donc en minimisant la force, on minimise aussi la quantité de carburant par distance. Pour optimiser le rendement du carburant, il faut voler à v_{optimale} . Ce graphique nous montre schématiquement la poussée nécessaire, en kilonewtons, pour un Boeing 747 de masse 319 tonnes, d'envergure 64,4 mètres, de coefficient de pénétration dans l'air égal à 0,03 et de surface frontale 180 m², se déplaçant dans un air de densité $\rho = 0,41 \text{ kg/m}^3$ (la densité à une altitude de 10 km), en fonction de sa vitesse v en m/s. Notre schéma a une vitesse optimale $v_{\text{optimale}} = 220 \text{ m/s}$ (800 km/h). Pour un schéma basé sur des saucisses, il reflète bien la réalité !

OISEAU		747	Albatros
Concepteur		Boeing	sélection naturelle
Masse (à pleine charge)	m	363 000 kg	8 kg
Envergure	w	64,4 m	3,3 m
Surface*	A_p	180 m ²	0,09 m ²
Densité	ρ	0,4 kg/m ³	1,2 kg/m ³
Coeff. de pénétration dans l'air	c_d	0,03	0,1
Vitesse optimale	v_{opt}	220 m/s = 790 km/h	14 m/s = 50 km/h

optimale pour un 747 volant à 10 000 mètres, nous devons nous rappeler que la densité de l'air diminue quand l'altitude z augmente selon la formule $\exp(-mgz/kT)$, où m est la masse des molécules de diazote et de dioxygène, et kT est l'énergie thermique (la constante de Boltzmann multipliée par la température absolue). La densité est environ 3 fois plus faible à cette altitude.

Les vitesses optimales que nous obtenons (tableau C.6) sont étonnamment proches des valeurs réelles ! La vitesse optimale prédite pour le 747 est de 790 km/h, et celle de l'albatros, 50 km/h — tous deux très proches des véritables vitesses de croisière de ces deux oiseaux (900 km/h pour le premier et entre 48 et 88 km/h pour le second).

Explorons d'autres prédictions de notre scénario. Nous pouvons vérifier que la force (C.13) est compatible avec la poussée connue d'un 747. En nous souvenant qu'à la vitesse optimale, les deux forces sont égales, il nous faut juste en prendre une et la multiplier par deux :

$$\text{force} = \left. \frac{\text{énergie}}{\text{distance}} \right|_{\text{idéale}} = \frac{1}{2} c_d \rho A_p v^2 + \frac{1}{2} \frac{(mg)^2}{\rho v^2 A_s} \tag{C.17}$$

$$= c_d \rho A_p v_{opt}^2 \tag{C.18}$$

$$= c_d \rho A_p \frac{mg}{\rho (c_d A_p A_s)^{1/2}} \tag{C.19}$$

$$= \left(\frac{c_d A_p}{A_s} \right)^{1/2} mg. \tag{C.20}$$

Définissons le facteur de remplissage f_A comme le rapport des surfaces :

$$f_A = \frac{A_p}{A_s}. \tag{C.21}$$

(On peut se représenter f_A comme la fraction du carré occupé par l'avion dans la figure C.7). Alors :

$$\text{force} = (c_d f_A)^{1/2} (mg). \tag{C.22}$$

Intéressant ! La poussée requise est indépendante de la densité du fluide au travers duquel l'avion vole, et elle est tout simplement une constante

TABLEAU C.6. Estimation de la vitesse optimale pour un jumbo jet et un albatros.
* Surface frontale estimée pour le 747 en prenant la largeur de la cabine (6,1 mètres) multipliée par la hauteur estimée du corps (10 mètres) et en multipliant par deux pour tenir compte de la surface frontale des moteurs, des ailes et de la queue ; pour l'albatros, surface frontale estimée à partir d'une photographie.

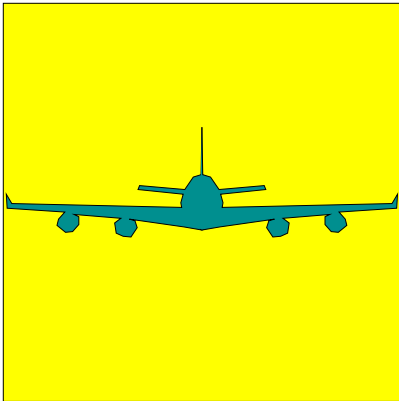


FIGURE C.7. Vue frontale d'un Boeing 747, utilisée pour estimer l'aire frontale A_p de l'avion. La surface du carré est A_s (l'envergure au carré).

sans dimension $(c_d f_A)^{1/2}$ fois le poids de l'avion. Cette constante, soit dit en passant, est connue sous le nom de « rapport portance sur traînée » de l'avion. (Le rapport portance sur traînée est aussi connu sous le nom de *finesse* ; le tableau C.8 en indique quelques valeurs typiques.)

En prenant les valeurs du jumbo jet, $c_d \simeq 0,03$ et $f_A \simeq 0,04$, on trouve que la poussée requise est de :

$$(c_d f_A)^{1/2} mg = 0,036 mg = 130 \text{ kN.} \quad (\text{C.23})$$

Cela est-il en accord avec la fiche technique d'un 747 ? En fait, chacun des 4 moteurs peut fournir une poussée maximale de 250 kN, mais cette poussée maximale ne sert que pour le décollage. En croisière, la poussée est bien moindre : pour un 747, elle est de 200 kN, soit 50 % de plus que ce que notre schéma a suggéré. Notre schéma est tombé un peu à côté, parce que notre estimation du rapport portance sur traînée était un peu basse.

Cette poussée peut être utilisée directement pour en déduire le rendement du transport obtenu pour n'importe quel avion. Nous pouvons calculer deux sortes de rendements : le coût énergétique pour faire voyager du *fret*, mesuré en kWh par tonne-kilomètre ; et le coût énergétique pour déplacer des gens, mesuré en kWh pour 100 passagers-kilomètres.

Rendement du transport de fret

La poussée est une force, et une force est une énergie par unité de distance. L'énergie totale consommée par le moteur est plus grande d'un facteur $(1/\epsilon)$, où ϵ est le rendement du moteur, que nous considérerons valoir $1/3$.

Voici le coût brut du transport, défini comme l'énergie par unité de masse (de l'appareil entier) par unité de distance :

$$\text{Coût du transport} = \frac{1}{\epsilon} \times \frac{\text{force}}{\text{masse}} \quad (\text{C.24})$$

$$= \frac{1}{\epsilon} \times \frac{(c_d f_A)^{1/2} mg}{m} \quad (\text{C.25})$$

$$= \frac{(c_d f_A)^{1/2}}{\epsilon} g. \quad (\text{C.26})$$

Ainsi, le coût du transport est simplement une valeur sans dimension (relative à la forme de l'avion et au rendement des moteurs), multipliée par g , l'accélération due à la gravité. Remarquez que ce coût brut du transport s'applique à tous les avions, mais ne dépend que de trois propriétés simples de l'avion : son coefficient de pénétration dans l'air, sa forme et le rendement de son moteur. Il ne dépend pas ni la taille de l'avion, ni de sa masse, ni de la densité de l'air. En y insérant le rendement $\epsilon = 1/3$ du moteur, et en considérant un rapport portance sur traînée égal à 20, nous trouvons que le coût brut du transport de *n'importe quel* avion, selon notre

Airbus A320	17
Boeing 767-200	19
Boeing 747-100	18
Sterne commune	12
Albatros	20

TABLEAU C.8. Rapports portance sur traînée.



FIGURE C.9. Cessna 310N : 60 kWh par 100 passagers-km. Un Cessna 310 Turbo transporte 6 passagers (incluant 1 pilote) à la vitesse de 370 km/h. Photographie par Adrian Pingstone.

schéma, est de :

$$0,15 \text{ g}$$

soit de :

$$0,4 \text{ kWh/tonne-km.}$$

Peut-on améliorer les avions ?

Si le rendement des moteurs ne peut être qu'un tout petit peu amélioré par les avancées technologiques à venir, et si la forme des avions a déjà atteint la quasi-perfection, alors on ne peut pas faire grand chose pour cette valeur sans dimension. L'efficacité du transport aérien est proche de sa limite physique. La communauté des aérodynamiciens nous dit que la forme des avions peut être encore un peu améliorée en passant à des carlingues avec aile fusionnée, et que le coefficient de pénétration dans l'air pourrait être réduit grâce au contrôle du flux laminaire, c'est-à-dire en réduisant l'accroissement de la turbulence au-dessus de l'aile en aspirant un peu d'air à travers de petites perforations dans sa surface (Braslow, 1999). L'ajout du contrôle du flux laminaire aux avions existants améliorerait de 15 % le coefficient de pénétration dans l'air, et le passage à une forme à aile fusionnée devrait l'améliorer de 18 % (Green, 2006). Et puisque l'équation (C.26) nous dit que le coût du transport est proportionnel à la racine carrée du coefficient de pénétration dans l'air, des améliorations de 15 % ou 18 % de c_d aboutiraient à une amélioration du coût du transport de, respectivement, 7,5 % et 9 %.

Ce coût de transport brut est le coût énergétique pour déplacer du poids, *y compris le poids de l'avion lui-même*. Pour estimer l'énergie nécessaire pour transporter du fret par avion, par unité de poids de fret, nous devons la diviser par la fraction qui constitue la cargaison. Par exemple, si un 747 version cargo, plein, a environ 1/3 de sa masse sous forme de fret, alors le coût du transport est de :

$$0,45 \text{ g,}$$

ou environ 1,2 kWh/tonne-km. Ce n'est que légèrement supérieur au coût du transport par camion, qui est de 1 kWh/tonne-km.

Rendement du transport de personnes

De façon similaire, nous pouvons estimer l'efficacité du transport de passagers d'un 747.

Rendement du transport (passager-km par litre de carburant)

$$= \text{nombre de passagers} \times \frac{\text{quantité d'énergie par litre}}{\text{poussée}} \quad (\text{C.27})$$

$$= \text{nombre de passagers} \times \frac{\epsilon \times \text{quantité d'énergie par litre}}{\text{poussée}} \quad (\text{C.28})$$



FIGURE C.10. « Attachez vos ceintures. » Un Bombardier Learjet 60XR, qui transporte 8 passagers à 780 km/h, a un coût de transport de 150 kWh pour 100 passagers-km. Photographie par Adrian Pingstone.

$$= 400 \times \frac{1}{3} \times \frac{38 \text{ MJ/litre}}{200\,000 \text{ N}} \quad (\text{C.29})$$

$$= 25 \text{ passager-km par litre} \quad (\text{C.30})$$

Ce qui est un peu plus efficace qu’une voiture typique avec un seul occupant (12 km par litre). Le voyage par avion présente donc un meilleur rendement énergétique que la voiture s’il n’y a qu’une ou deux personnes dans la voiture ; mais les voitures sont plus efficaces si elles contiennent trois passagers ou plus.

Points clés

Nous avons parcouru un bon bout de chemin ! Récapitulons les points clés. La moitié de l’effort fourni par l’avion lui sert à *rester en l’air* ; l’autre moitié lui sert à *avancer*. Nous avons trouvé que le rendement en carburant à la vitesse optimale, exprimé sous forme d’une énergie par unité de distance parcourue, se trouve dans la force (C.22), et qu’il était tout simplement proportionnel à la masse de l’avion. La constance de proportionnalité est le rapport portance sur traînée, qui est déterminé par la forme de l’avion. Donc, alors qu’un abaissement de la vitesse limite des voitures réduirait l’énergie consommée par unité de distance parcourue, il n’y a pas lieu d’envisager des limitations de vitesse pour les avions. Les avions actuellement en vol ont des vitesses optimales, différentes pour chaque avion, dépendantes de leur poids, et ils vont déjà à leur vitesse optimale. Si vous donniez à l’avion l’ordre de ralentir, sa consommation énergétique *augmenterait*. La seule façon de rendre l’avion plus économe est de le poser au sol et de l’arrêter. Les avions ont déjà été optimisés de manière fantastique, et il n’y a aucune amélioration significative de leur efficacité en vue. (Voir les pages 44 et 157 pour une discussion plus approfondie de la notion selon laquelle les nouveaux superjumbos seraient « bien plus efficaces » que les vieux jumbos ; et page 43 pour une discussion de la notion selon laquelle les turbopropulseurs sont « bien plus efficaces » que les moteurs à réaction).

Rayon d’action

Une autre prédiction que nous pouvons faire, c’est celle du rayon d’action d’un avion ou d’un oiseau — la plus longue distance qu’il peut parcourir sans refaire le plein. Peut-être pensez-vous qu’un avion plus gros peut aller plus loin, mais la prédiction de notre modèle est étonnamment simple. Le rayon d’action d’un avion, la distance maximale qu’il peut parcourir avant de devoir se ravitailler, est proportionnel à sa vitesse et à l’énergie totale du carburant, et il est inversement proportionnel au rythme auquel l’avion engloutit ce carburant :

$$\text{rayon d’action} = v_{\text{opt}} \frac{\text{énergie}}{\text{puissance}} = \frac{\text{énergie} \times \epsilon}{\text{force}}. \quad (\text{C.31})$$



FIGURE C.11. Boeing 737-700 :
30 kWh pour 100 passagers-km.
Photographie © Tom Collins.

Or, l'énergie totale du carburant est sa valeur calorifique, C (en joules par kilogramme), multipliée par sa masse ; et la masse du carburant est une fraction $f_{\text{carburant}}$ de la masse totale de l'avion. Ainsi :

$$\text{rayon d'action} = \frac{\text{énergie } \epsilon}{\text{force}} = \frac{C m \epsilon f_{\text{carburant}}}{(c_d f_A)^{1/2} (m g)} = \frac{\epsilon f_{\text{carburant}}}{(c_d f_A)^{1/2}} \frac{C}{g}. \quad (\text{C.32})$$

Il est difficile d'imaginer une prédiction plus simple : le rayon d'action de tout oiseau ou avion est le produit d'un facteur sans dimension $\left(\frac{\epsilon f_{\text{carburant}}}{(c_d f_A)^{1/2}} \right)$ qui prend en compte le rendement du moteur, le coefficient de pénétration dans l'air, et la géométrie de l'oiseau, et d'une distance fondamentale,

$$\frac{C}{g},$$

qui est une propriété du carburant et de la gravité, et rien d'autre. Pas de taille, pas de masse, pas de longueur, pas de largeur de l'oiseau ; pas de dépendance de la densité du carburant.

Mais alors, c'est quoi, cette distance magique ? Cette distance est la même que le carburant soit de la graisse d'oie ou du kérosène : ces deux carburants sont essentiellement constitués d'hydrocarbures $(\text{CH}_2)_n$. Le kérosène a une valeur calorifique $C = 40 \text{ MJ par kg}$. La distance associée au kérosène est de :

$$d_{\text{carburant}} = \frac{C}{g} = 4\,000 \text{ km}. \quad (\text{C.33})$$

Le rayon d'action de l'oiseau de métal est la portée intrinsèque du carburant, 4 000 km, multipliée par un facteur $\left(\frac{\epsilon f_{\text{carburant}}}{(c_d f_A)^{1/2}} \right)$. Si notre oiseau a un moteur au rendement de $\epsilon = 1/3$ et un rapport portance sur traînée de $(c_d f_A)^{1/2} \simeq 1/20$, et si presque la moitié de notre oiseau est constitué de carburant (un 747 une fois le plein fait, c'est 46 % de kérosène), nous trouvons que tous les oiseaux et avions, quelle que soit leur taille, ont le même rayon d'action : à peu près trois fois la distance du carburant — en gros 13 000 km.

Là encore, ce chiffre est proche de la réalité : le record de vol sans escale pour un 747 (établi les 23 et 24 mars 1989) est de 16 560 km de distance.

De plus, cette affirmation selon laquelle le rayon d'action est indépendant de la taille de l'oiseau est étayée par l'observation que des oiseaux de toutes tailles, des grandes oies aux délicates hirondelles et aux sternes arctiques, migrent sur des distances intercontinentales. Le vol sans escale le plus long jamais enregistré pour un oiseau — en l'occurrence, une barge rousse — était long de 11 000 km.

Quelle a été la distance parcourue par Steve Fosset dans son avion en matériaux composites, le Virgin Atlantic GlobalFlyer modèle 311 ? 41 467 km. [33ptcg] C'était un avion un peu spécial : 83 % de son poids au décollage était du carburant ; le vol a exploité les vents dominants d'altitude

Vous pouvez voir $d_{\text{carburant}}$ comme la distance à laquelle le carburant se jetterait s'il convertissait brutalement toute son énergie chimique en énergie cinétique et se lançait lui-même sur une trajectoire parabolique, sans résistance de l'air. [Pour être précis, la distance atteinte avec la parabole optimale est le double de C/g .] Cette distance est aussi la hauteur *verticale* à laquelle le carburant se lancerait sans résistance de l'air. Une autre chose amusante que l'on peut remarquer est que la valeur calorifique du carburant C , que j'ai donnée en joules par kilogrammes, est aussi une vitesse mise au carré (tout comme le rapport énergie-sur-masse E/m , dans l'équation d'Einstein $E = mc^2$, est une vitesse au carré, c^2) : $40 \times 10^6 \text{ J par kg fait } (6\,000 \text{ m/s})^2$. On peut donc considérer la graisse ainsi : « la graisse est égale à 6 000 mètres par seconde ». Si vous voulez perdre du poids en faisant du jogging, 6 000 m/s (22 000 km/h) est la vitesse qui vous permettra de tout perdre en un seul bond de géant.

pour augmenter sa distance. Fragile, cet avion a connu plusieurs pannes en route.

Un point intéressant auquel nous mène notre schéma : si nous nous posons la question « quelle est la densité d'air optimale pour voler ? », nous trouvons que la *poussée* requise (C.20) à la vitesse optimale est indépendante de la densité. Donc, notre avion schématique serait tout aussi heureux quelle que soit la hauteur ; il n'y a pas de densité optimale. L'avion réalise le même nombre de kilomètres par litre de carburant quelle que soit la densité ; mais la *vitesse* optimale, elle, dépend de la densité ($v^2 \sim 1/\rho$, équation (C.16)). Donc, toutes choses égales par ailleurs, la durée de voyage de notre avion schématique serait la plus courte en volant dans un air aussi peu dense que possible. En fait, le rendement d'un moteur réel n'est pas indépendant de la vitesse et de la densité de l'air. Notre avion s'allégeant en brûlant son carburant, notre schéma nous dit que sa vitesse optimale à une densité donnée diminue ($v^2 \sim mg/(\rho(c_d A_p A_s)^{1/2})$). Donc un avion qui voyage dans un air de densité constante devrait ralentir un peu alors qu'il s'allège. Mais un avion peut à la fois voler à une *vitesse constante* tout en continuant à sa *vitesse optimale* s'il augmente son altitude afin de réduire la densité de l'air. Lors de votre prochain vol long-courrier, vous pourrez vérifier que le pilote augmente son altitude de croisière de, disons, 31 000 pieds au début jusqu'à 39 000 pieds vers la fin du vol.

Comment un avion à l'hydrogène s'en sortirait-il ?

Nous sommes déjà arrivés à la conclusion que le rendement du vol aérien, en terme de quantité d'énergie par tonne-km, est une simple constante sans dimension que multiplie g . Changer de carburant ne va pas modifier cet argument fondamental. Cela vaut le coup de s'intéresser aux avions à hydrogène si l'on veut réduire nos émissions de gaz à effets de serre. Ils pourraient aussi avoir un rayon d'action amélioré. Mais n'espérez pas qu'ils soient radicalement plus efficaces sur le plan énergétique.

Pistes d'amélioration du rendement des avions

Voler en formation, comme le font les oies, pourrait aboutir à un gain de 10 % de rendement du carburant (car le rapport portance sur traînée de la formation est supérieur à celui d'un avion isolé), mais bien sûr, cette astuce ne fonctionne que pour les oies désireuses de migrer vers la même destination au même moment.

Optimiser la longueur des sauts : les avions très-long courrier (conçus pour avoir un rayon d'action dans les 15 000 km) ont un rendement un peu inférieur à des avions moyen-courrier, car ils doivent transporter plus de carburant, ce qui laisse moins de place pour le fret et les passagers. Il serait énergétiquement plus rentable de faire des sauts de puce avec des avions à plus courte portée. La distance idéale étant d'environ 5 000 km,

les voyages longue-distance comporteraient donc un ou deux arrêts pour refaire le plein (Green, 2006). Les vols longue-distance à étapes multiples pourraient avoir un rendement amélioré d'environ 15 % ; mais bien sûr, cela impliquerait d'autres coûts.

Les avions éco-compatibles

A l'occasion, vous avez certainement entendu parler de gens qui auraient construit un avion écologiquement correct. Et pourtant, plus tôt dans ce chapitre, notre schéma nous a conduit à affirmer que le coût de transport de *n'importe* quel avion est d'environ :

0,4 kWh/tonne-km.

Selon ce schéma, les seules possibilités d'améliorer significativement ce chiffre pour un avion serait de réduire la résistance à l'air (par exemple, grâce à une astuce du genre aspirateur-dans-les-ailes) ou de changer la géométrie de l'avion (en le faisant plus ressembler à un planeur, avec des ailes immensément larges comparées au fuselage, voire en se débarrassant carrément du fuselage).

Regardons de plus près les annonces récentes sur « l'aviation éco-compatible » et voyons si l'un de ces avions parvient à battre notre référence de 0,4 kWh par tonne-km. Si un avion utilise moins que 0,4 kWh par tonne-km, nous devrions conclure que notre schéma comporte une erreur.

L'Electra, un monoplace en bois et en tissu, a fait un vol de 50 km en 48 minutes autour des Alpes du sud le 23 décembre 2007 [6r32hf]. L'Electra a une envergure de 9 mètres et un moteur électrique de 18 kW alimenté par 48 kg de batteries lithium-polymère. Le poids de l'appareil au décollage est de 265 kg (134 kg pour l'appareil, 47 kg de batteries et 84 kg de cargaison humaine). En supposant que la densité énergétique de la batterie était de 130 Wh/kg, et que le vol a consommé 90 % d'une pleine charge (5,5 kWh), le coût de transport a été d'environ :

0,4 kWh/tonne-km,

ce qui colle exactement avec notre schéma. Cet avion électrique n'a pas un besoin énergétique moindre de celui d'une pompe à combustible fossile standard.

Bien sûr, ce n'est pas pour autant que les avions électriques ne sont pas intéressants. Si l'on pouvait remplacer les avions traditionnels par des alternatives consommant autant d'énergie mais sans émission de carbone, ce serait indubitablement une technologie utile. Et, en tant que transport de personnes, l'Electra atteint une consommation tout à fait respectable de **11 kWh pour 100 p-km**, ce qui est similaire celle d'une voiture électrique dans notre diagramme des transports en page 152. Mais dans ce livre, on en revient toujours à ce problème fondamental : « d'où l'énergie vient-elle ? »



FIGURE C.12. L'Electra F-WMDJ : **11 kWh pour 100 p-km**. Photo par Jean-Bernard Gache. www.apame.eu

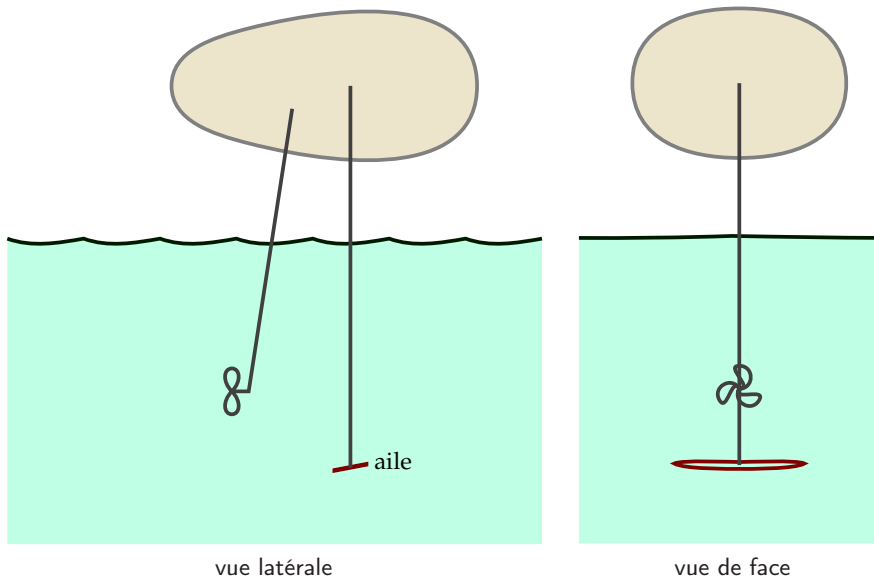


FIGURE C.13. Hydroptère.
Photographie par Georgios Pazios.

De nombreux bateaux sont aussi des oiseaux

Quelque temps après avoir rédigé ce schéma sur le vol aérien, j'ai réalisé qu'il s'appliquait à d'autres oiseaux que ceux en l'air : il s'applique aux hydroptères, ainsi qu'à d'autres embarcations rapides ; bref, tous ceux qui s'élèvent au-dessus de l'eau quand ils se déplacent.

La figure C.13 nous montre le principe de l'hydroptère. La masse de l'embarcation est supportée par une aile submergée inclinée, qui peut être fort petite comparée à la coque. Cette aile génère de la portance en rejetant un fluide vers le bas, tout comme l'avion de la figure C.2. En admettant que la traînée soit dominée par la friction sur l'aile, et que les dimensions de l'aile et la vitesse du navire aient été optimisées pour minimiser l'énergie dépensée par unité de distance, alors le meilleur coût de transport possible, au sens de la quantité d'énergie par tonne-kilomètre, sera pile celle de l'équation C.26 :

$$\frac{(c_d f_A)^{1/2}}{\epsilon} g, \quad (\text{C.34})$$

où c_d est le coefficient de pénétration de l'aile immergée, f_A est le rapport de surfaces sans dimension défini précédemment, ϵ est le rendement du moteur, et g l'accélération due à la gravité.

Il se peut que les valeurs de c_d et de f_A ne soient pas tout à fait les mêmes que celles d'un aéroplane optimisé. Mais un point remarquable de cette théorie est l'absence de dépendance de la densité du fluide à travers lequel l'aile vole. Et donc, nous pouvons prédire, à la louche, que le coût du transport (énergie par unité de distance et de masse, en incluant la masse du véhicule) d'un hydroptère est *le même* que le coût de transport

d'un avion ! A savoir, environ 0,4 kWh par tonne-km.

Pour des navires qui effleurent la surface de l'eau, tels que des catamarans à grande vitesse ou des skieurs nautiques, un schéma correct devrait aussi inclure l'énergie qui sert à produire des vagues, mais je soupçonne que cette théorie de l'hydroptère reste à peu près valide.

Je n'ai pas encore trouvé des données sur le coût de transport d'un hydroptère, mais certains chiffres pour un catamaran transportant des passagers à 41 km/h semblent en assez bon accord : il consomme environ 1 kWh par tonne-km.

J'ai été tout à fait surpris d'apprendre qu'un voyageur au long cours qui saute d'une île à l'autre en avion ne se contente pas d'aller plus vite que celui qui ferait le voyage par bateau — il consomme aussi probablement moins d'énergie.

D'autres façons de rester en l'air

Les aérostats

Ce chapitre a mis en lumière le fait que l'on ne peut pas rendre les avions plus économes en les ralentissant, parce que tout le bénéfice d'une moindre résistance de l'air serait plus qu'annulé par le fait de devoir rejeter plus fortement de l'air vers le bas. Pourrait-on résoudre ce problème en changeant de stratégie : au lieu de rejeter de l'air vers le bas, peut-on être aussi léger que l'air ? Un aérostat, zeppelin ou dirigeable utilise un énorme ballon rempli d'hélium, qui est plus léger que l'air, pour compenser le poids de sa petite cabine. L'inconvénient de cette stratégie est que cet énorme ballon augmente considérablement la résistance à l'air du véhicule.

Afin de limiter le coût énergétique (par unité de masse et de distance) de l'aérostat, il faut aller lentement, ressembler à un poisson, et être très grand et long. Faisons un petit schéma de l'énergie requise par un aérostat idéalisé.

Je vais supposer que le ballon est un ellipsoïde, avec une surface transversale A et une longueur L . Le volume est $V = \frac{2}{3}AL$. Si le dirigeable flotte stabilisé dans de l'air de densité ρ , la masse totale du vaisseau, y compris sa cargaison et son hélium, doit être égale à $m_{\text{totale}} = \rho V$. S'il se déplace à la vitesse v , la force de résistance de l'air est de :

$$F = \frac{1}{2}c_d A \rho v^2, \quad (\text{C.35})$$

où c_d est le coefficient de pénétration dans l'air, que l'on peut estimer être aux alentours de 0,03 en se fondant sur les avions. L'énergie dépensée par unité de distance est égale à F divisé par le rendement ϵ des moteurs. Donc le coût brut du transport — la quantité d'énergie consommée par



FIGURE C.14. L'USS Akron (ZRS-4), long de 239 mètres, au-dessus de Manhattan. Il pesait 100 tonnes et pouvait transporter 83 tonnes. La puissance totale de ses moteurs était de 3,4 MW, et il pouvait transporter un équipage de 89 personnes et un chargement d'armes à 93 km/h. Il servait aussi à transporter des avions.

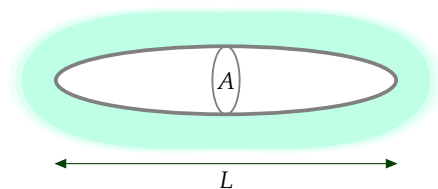


FIGURE C.15. Un dirigeable ellipsoïdal.

unité de distance et de masse — est égale à :

$$\frac{F}{\epsilon m_{\text{totale}}} = \frac{\frac{1}{2} c_d A \rho v^2}{\epsilon \rho \frac{2}{3} A L} \quad (\text{C.36})$$

$$= \frac{3}{4\epsilon} c_d \frac{v^2}{L} \quad (\text{C.37})$$

Voilà un résultat plutôt sympathique ! Le coût de transport brut de cet aérostat idéalisé ne dépend que de sa vitesse v et de sa longueur L , et ni de la densité de l'air ρ , ni de la surface frontale du vaisseau A .

Ce schéma peut aussi être appliqué sans modification à des sous-marins. Le coût de transport brut (en kWh par tonne-km) d'un dirigeable est pile identique au coût brut de transport d'un sous-marin de même longueur, et de même vitesse. Le sous-marin contiendra une masse 1 000 fois supérieure, puisque l'eau est 1 000 fois plus dense que l'air ; et cela coûtera 1 000 fois plus d'énergie de le faire bouger. La seule différence entre les deux sera le revenu publicitaire.

Maintenant, voyons un peu ce que donnent les chiffres. Supposons que nous voulions voyager à 80 km/h (de manière à ce que la traversée de l'Atlantique prenne trois jours). En unités du système international, cela fait 22 m/s. Supposons que le rendement ϵ soit égal à 1/4. Afin d'obtenir le meilleur coût de transport possible, quel est le plus long dirigeable que nous puissions envisager ? Le Hindenburg était long de 245 mètres. Si on prend $L = 400$ mètres, nous trouvons un coût du transport égal à :

$$\frac{F}{\epsilon m_{\text{totale}}} = 3 \times 0,03 \times \frac{(22 \text{ m/s})^2}{400 \text{ m}} = 0,1 \text{ m/s}^2 = 0,03 \text{ kWh/t-km.}$$

Si la cargaison utile représentait la moitié de la masse du vaisseau, le coût net du transport de cet aérostat monstre serait de **0,06 kWh/t-km** — similaire à celui du rail.

Les ékranoplanes

Un ékranoplane, ou vaisseau ailé volant au ras des vagues, est un aéro-nef à effet de sol : un appareil qui vole très près de la surface de l'eau, ce qui lui permet d'obtenir sa portance non pas en projetant de l'air vers le bas comme un avion, ou en projetant de l'eau vers le bas comme un hydroptère, mais en s'appuyant sur un coussin d'air pris en sandwich entre ses ailes et la proche surface. Vous pouvez démontrer cet effet de sol en lançant une carte à jouer au ras d'une table plane. Maintenir ce coussin d'air requiert très peu d'énergie, et donc un appareil à effet de sol, en termes énergétiques, se comporte largement comme un véhicule de surface sans résistance au roulement. Sa principale dépense énergétique est associée à la résistance de l'air. Rappelez-vous que pour un avion, la moitié de la dépense d'énergie est associée à la résistance de l'air, et l'autre moitié au rejet de l'air vers le bas.

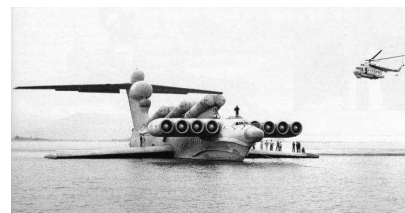


FIGURE C.16. Le Lun, un ékranoplane — un peu plus long et lourd qu'un Boeing 747.
Photographies : A. Belyaev.

L'Union Soviétique a développé l'écranoplane sous l'ère Krouchtchev en tant que transport militaire et lance-missiles. Le Lun pouvait se déplacer à 500 km/h, et la poussée totale de ses huit moteurs était de 1 000 kN, bien que ce total ne soit plus nécessaire une fois que le vaisseau s'était élevé au-dessus de l'eau. En supposant que la poussée en vitesse de croisière était un quart du maximum, que le rendement des moteurs était de 30 %, et que sur sa masse de 400 tonnes, il y avait 100 tonnes de cargaison, alors ce véhicule avait un coût net de transport de fret de **2 kWh par tonne-km**. J'imagine que s'il était optimisé pour le transport de fret non militaire, l'écranoplane pourrait avoir un coût de transport de fret d'environ la moitié de celui d'un avion ordinaire.

Légendes urbaines

Le vol était programmé de toute façon, et donc le fait que je prenne l'avion était énergétiquement neutre.

Ceci est faux pour deux raisons. Premièrement, votre poids supplémentaire fait consommer plus d'énergie par l'avion pour vous garder en l'air. Deuxièmement, les compagnies aériennes répondent à la demande en faisant voler plus d'avions.

Notes et bibliographie

Page n°

321 *Boeing 747*. Le coefficient de pénétration dans l'air du 747 est tiré de www.aerospaceweb.org. Les autres données sur le 747 proviennent de [2af5gw]. Les informations sur l'albatros viennent de [32judd].

- *Dans la réalité, les réacteurs ont un rendement d'environ $\epsilon = 1/3$* . Les rendements typiques des moteurs sont de l'ordre de 23 à 36 % [adg.stanford.edu/aa241/propulsion/sfc.html]. Pour un avion typique, le rendement global du moteur va de 20 à 40 %, les meilleurs réacteurs à double flux atteignant 30 à 37 % en vitesse de croisière [www.grida.no/climate/ipcc/aviation/097.htm]. Cependant, vous ne pouvez pas forcément choisir le moteur ayant le meilleur rendement, car il se peut qu'il soit plus lourd (je veux dire par là que sa masse pourrait être plus élevée par unité de poussée obtenue), ce qui réduirait le rendement global de l'avion.

326 *le vol sans escale le plus long jamais enregistré pour un oiseau...*
New Scientist 2492. « La barge rousse est la reine des airs. » 26 mars 2005.
 11 septembre 2007 : une barge vole 11 500 km non-stop de l'Alaska à la Nouvelle-Zélande. [2qbqv]

327 *Optimisation des sauts de puce : la distance idéale est d'environ 5 000 km*. Source : Green (2006).

330 *Chiffres pour un catamaran transportant des passagers*. Source [5h6xph] : masse déplacée (à pleine charge) 26,3 tonnes. Pour un voyage de 1 050 milles marins, ce bateau a consommé exactement 4 780 litres de carburant. D'après mon calcul, cela représente un coût de transport de fret de 0,93 kWh par tonne-km. Soit dit en passant, je fais ce calcul à partir du poids total de l'embarcation. Le rendement de transport des *passagers* par ce même vaisseau est d'environ 35 kWh pour 100 p-km.

332 *L'écranoplane Lun*. Sources : www.fas.org [4p3yco], (Taylor, 2002a).

Pour en savoir plus : Tennekes (1997), Shyy et al. (1999).

D Solaire II

En page 50, nous avons listé 4 possibilités de production de biomasse solaire :

1. « Substitution du charbon » ;
2. « Substitution du pétrole » ;
3. Aliments pour l'homme et les autres animaux ;
4. Incinération de sous-produits agricoles.

Nous allons maintenant étudier chacun de ces processus l'un après l'autre et estimer leur contribution maximum. En pratique, beaucoup de ces filières requièrent d'*injecter* tellement d'énergie qu'elles sont rarement contributrices nettes (figure 6.14). Mais dans ce qui suit, je vais volontairement mettre de côté les coûts associés à leur énergie incorporée.

Des cultures énergétiques comme substituts au charbon

Si, en Grande-Bretagne, on cultivait des cultures énergétiques comme le saule, le miscanthus ou le peuplier (qui ont une densité de puissance moyenne de $0,5 \text{ W}$ par mètre carré de terre cultivée), et si on les utilisait pour alimenter une centrale électrique au rendement de 40 %, on se retrouverait alors au final avec une puissance par unité de surface de $0,2 \text{ W/m}^2$. Si on recouvrait de ces cultures un huitième de Grande-Bretagne (soit 500 m^2 par personne), la puissance obtenue serait de $2,5 \text{ kWh/j}$ par personne.

Substituts au pétrole

Il y a plusieurs façons de transformer des plantes en carburants liquides. J'exprimerai le potentiel de chacune de ces méthodes en termes de puissance par unité de surface (comme dans la figure 6.12).

La principale source de biodiesel en Grande-Bretagne, le colza

Habituellement, on plante le colza en septembre et on le récolte au mois d'août qui suit. Actuellement, 450 000 hectares de colza sont cultivés chaque année au Royaume-Uni (soit 2 % de la superficie nationale). Les champs de colza produisent 1 200 litres de biodiesel par hectare et par an ; le biodiesel a une énergie de $9,8 \text{ kWh}$ par litre. Cela fait donc une puissance par unité de surface de $0,13 \text{ W/m}^2$.

Si on utilisait 25 % de la superficie du pays pour la culture de colza, on obtiendrait alors du biodiesel avec un contenu énergétique de $3,1 \text{ kWh/j}$ par personne.



FIGURE D.1. Deux arbres.



FIGURE D.2. Champs de colza. Quand on l'utilise pour produire du biodiesel, la puissance par unité de surface du colza est de $0,13 \text{ W/m}^2$. Photo de Tim Dunne.

De la betterave à l'éthanol

Au Royaume-Uni, la culture de la betterave à sucre atteint un rendement remarquable, de 53 tonnes par hectare et par an. Et 1 tonne de betterave permet d'obtenir 108 litres de bioéthanol, dont la densité énergétique est de 6 kWh par litre. Cette filière fournit donc une puissance par unité de surface de 0,4 W/m², sans compter les intrants énergétiques requis.

Bioéthanol à partir de canne à sucre

Là où la canne à sucre peut être produite (par exemple, au Brésil), la production est de 80 tonnes par hectare et par an, soit un rendement de 17 600 litres d'éthanol. Le bioéthanol a une densité énergétique de 6 kWh par litre. Sa production fournit donc une puissance par unité de surface de 1,2 W/m².

Bioéthanol à partir de maïs aux États-Unis

La puissance par unité de surface du bioéthanol produit à partir de maïs est incroyablement faible. Histoire de s'amuser un peu, commençons par exprimer ces chiffres dans des unités archaïques. 1 acre produit 122 boisseaux de maïs par an, ce qui fait 122 × 2,6 gallons d'éthanol, ce qui, avec 84 000 BTU d'énergie par gallon, offrent une puissance par unité de surface de 0,2 W/m² (7,67 tonnes de maïs par hectare et par an, qui donnent 1 200 litres d'éthanol par hectare et par an ; valeur calorifique de l'éthanol : 23,4 MJ/L).

Cependant, les intrants énergétiques requis pour transformer le maïs en éthanol ont une densité énergétique de 83 000 BTU par gallon. Ce qui signifie que 99 % de l'énergie produite est consommée par le processus de transformation, et que la puissance nette par unité de surface est d'environ 0,002 W/m². La seule manière d'obtenir une puissance nette significative du processus de transformation du maïs en éthanol est de s'assurer que tous les sous-produits sont exploités. Si on prend en compte l'énergie dans les sous-produits, la puissance nette par unité de surface est d'environ 0,05 W/m².

Éthanol cellulosique à partir de panic érigé

L'éthanol cellulosique — le biocarburant merveilleux de « prochaine génération » ? Schmer et al. (2008) ont trouvé que le rendement énergétique net du panic érigé cultivé pendant cinq ans sur les terres marginales de 10 fermes du Midwest américain était de 60 GJ par hectare et par an, ce qui fait une densité de puissance de 0,2 W/m². « Cette étude repose sur les connaissances génétiques et les techniques agronomiques disponibles pour la production de panic érigé en 2000 et 2001, au moment où les champs ont

	densité énergétique (kWh/kg)
bois de résineux	
– séché à l'air libre	4,4
– séché au four	5,5
bois de feuillus	
– séché à l'air libre	3,75
– séché au four	5,0
papier de bureau	4,0
papier glacé	4,1
papier journal	4,9
carton	4,5
charbon	8
paille	4,2
fientes de volailles	2,4
déchets industriels banals	4,4
déchets hospitaliers	3,9
déchets municipaux	2,6
déchets ménagers dérivés	5,1
pneumatiques	8,9

TABLEAU D.3. Pouvoirs calorifiques de bois et d'autres matières comparables. Sources : Yaros (1997) ; Ucuncu (1993) ; Digest of UK Energy Statistics 2005.



été semés. A l'avenir, il est possible que des progrès génétiques et agronomiques puissent améliorer le bilan énergétique du biocarburant produit à partir de panic érigé. »

Le jatropha présente lui aussi une faible densité de puissance

Le jatropha est un oléagineux qui croît plus facilement dans les zones tropicales sèches (300 à 1 000 mm de pluie par an). Il aime les températures comprises entre 20 et 28 °C. Le rendement attendu dans les pays chauds, sur de bonnes terres, est de 1 600 litres de biodiesel par hectare et par an. Ce qui fait une puissance par unité de surface de 0,18 W/m². Sur des terres incultes, son rendement tombe à 583 litres par hectare et par an. Soit une densité de puissance de 0,065 W/m².

Si l'on décidait d'utiliser 10 % du continent africain pour produire 0,065 W/m², et que l'on partageait cette énergie entre six milliards d'habitants, qu'est-ce qu'on obtiendrait ? 0,8 kWh/j par personne. A titre de comparaison, la consommation mondiale de pétrole est de 80 millions de barils par jour, qui, partagés entre 6 milliards de personnes, représentent 23 kWh/j par personne. Donc, même si toute l'Afrique était recouverte de champs de jatropha, la puissance produite représenterait à peine un tiers de la consommation mondiale de pétrole.

Qu'en est-il des algues ?

Les algues ne sont que des plantes, donc tout ce que j'ai dit jusqu'à présent s'applique aussi aux algues. Les micro-algues aquatiques ne sont pas plus efficaces pour la photosynthèse que leurs cousines terrestres. Mais il y a un point que je n'ai pas abordé, et qui est monnaie courante dans la communauté des biocarburants produits à partir d'algues : on fait pousser ces algues dans des eaux fortement enrichies en CO₂, qui peut provenir, dans certains cas, des gaz d'échappement des centrales électriques ou d'autres installations industrielles. Pour les plantes, il est nettement plus facile de faire de la photosynthèse lorsque quelqu'un a déjà concentré le dioxyde de carbone à leur place. Ainsi, dans un site ensoleillé des États-Unis, dans des bassins enrichis en CO₂ (avec une concentration de 10 %), Ron Putt de l'Université d'Auburn a annoncé que les algues pouvaient croître à un rythme de 30 g par mètre carré et par jour, produisant 0,01 litre de biodiesel par mètre carré et par jour. Cela correspond à une puissance par unité de surface du bassin de 4 W/m² — similaire aux rendements des fermes photovoltaïques bavaroises. Si vous vouliez conduire une voiture moyenne (qui consomme 8 litres aux 100 km) sur une distance de 50 km par jour, il ne vous faudrait alors pas moins de 420 mètres carrés de bassins à algues pour alimenter votre voiture ; à titre de comparaison, la superficie du Royaume-Uni est de 4 000 m² par personne, dont 69 m² est de l'eau (figure 6.8). Et n'oubliez pas qu'il est indispensable d'alimenter ces bassins

avec du dioxyde de carbone concentré. Une telle filière serait donc limitée à la fois par la superficie de terres — quelle superficie du Royaume-Uni pourrait-on convertir à la production d'algues en bassins ? — et par la disponibilité en CO_2 concentré, dont la capture a un coût énergétique (un sujet dont nous avons parlé dans les chapitres 23 et 31). Vérifions les limites imposées par le CO_2 concentré. Pour cultiver 30 g d'algues par m^2 et par jour, il faut au moins 60 g de CO_2 par m^2 et par jour (puisque, par atome de carbone qui s'y trouve, la masse de la molécule de CO_2 est plus grande que celle des molécules dans les algues). Si on capturait la totalité du CO_2 issu de l'ensemble des centrales électriques du Royaume-Uni (approximativement 2,5 tonnes par an et par personne), cela pourrait alimenter **230 mètres carrés** par personne de bassins d'algues similaires à ceux décrits ci-dessus — soit environ 6 % du pays. Cette superficie permettrait de produire du biodiesel avec une puissance de 24 kWh par jour et par personne, en supposant que les chiffres valables pour les zones ensoleillées des États-Unis s'y appliquent. Est-ce une vision plausible ? Peut-être sur un dixième de cette échelle ? Je vous laisse le soin d'en décider.

Quid de la culture d'algues en mer ?

Souvenez-vous de ce que je viens de dire : le biodiesel à base d'algues nécessite d'être alimenté en CO_2 concentré. Si l'on cultive à la surface de la mer, il est peu vraisemblable qu'on puisse pomper le CO_2 de la mer. Et sans CO_2 concentré, le rendement des algues est 100 fois moindre. Pour que la culture d'algues en mer fasse la différence, il faudrait les cultiver sur une superficie comparable à celle d'un pays entier.

Et les algues capables de produire de l'hydrogène ?

Essayer d'avoir une bactérie capable de produire de l'hydrogène à partir de la lumière du soleil est une bonne idée, parce que cela permet d'éviter toute une série d'étapes chimiques habituellement réalisées par les plantes qui produisent des glucides. Alors que chaque étape chimique réduit un peu le rendement, ici, l'hydrogène peut être produit directement par le système photosynthétique, dès la première étape. Une étude de recherche du *National Renewable Energy Laboratory* au Colorado a estimé qu'un réacteur rempli d'algues vertes génétiquement modifiées, couvrant une superficie de 11 hectares dans le désert de l'Arizona, pourrait produire 300 kg d'hydrogène par jour. L'hydrogène contient 39 kWh par kg, donc cette installation de production d'hydrogène par des algues fournirait une puissance par unité de surface de $4,4 \text{ W/m}^2$. En tenant compte de la quantité d'électricité nécessaire au fonctionnement de l'unité de production, la densité de puissance nette fournie serait ramenée à $3,6 \text{ W/m}^2$. Voilà qui ressemble fort à un chiffre plutôt prometteur — comparez-le donc à celui de la ferme photovoltaïque bavaroise, par exemple (5 W/m^2).

Nourriture pour l'homme ou d'autres animaux

Les graines de céréales telles que le blé, l'avoine, l'orge et le maïs ont une densité énergétique d'environ 4 kWh par kg. Au Royaume-Uni, des rendements de 7,7 tonnes de blé par hectare et par an sont classiques. Si le blé est mangé par un animal, la puissance par unité de surface de ce processus est de $0,34 \text{ W/m}^2$. Et si $2\,800 \text{ m}^2$ par personne au Royaume-Uni (soit la totalité des terres agricoles britanniques) étaient dédiés à ce type de cultures, la puissance produite sous forme chimique serait d'environ **24 kWh/j par personne**.

L'incinération de sous-produits agricoles

Nous avons trouvé précédemment que la puissance par unité de surface d'une centrale électrique alimentée à partir des meilleures cultures énergétiques était de $0,2 \text{ W/m}^2$. Si, au lieu de cela, on cultivait des céréales à des fins alimentaires, et que l'on utilisait seulement les sous-produits agricoles pour alimenter une centrale électrique — ou bien si l'on utilisait ces cultures pour nourrir des poulets et que l'on récupérerait leurs fientes pour alimenter une centrale électrique — quelle serait la puissance par unité de surface exploitée? Faisons d'abord une estimation à la louche, puis nous regarderons des données réelles d'un peu plus près. Pour l'estimation grossière, imaginons que les sous-produits soient récoltés sur la moitié de la surface agricole du pays ($2\,000 \text{ m}^2$ par personne) puis transportés vers les centrales, et que ces sous-produits génère, en moyenne, de l'ordre de 10 % de la puissance par unité de surface obtenue à partir des meilleures cultures énergétiques : $0,02 \text{ W/m}^2$. En multipliant ce chiffre par $2\,000 \text{ m}^2$, on obtient **1 kWh par jour et par personne**.

Mon estimation à la louche est-elle injuste envers les déchets agricoles? Nous pouvons faire un nouveau calcul de la production potentielle des sous-produits agricoles en extrapolant la production d'énergie par combustion de paille du prototype de centrale électrique d'Elean dans l'Est-Anglie (au sud-est de l'Angleterre). L'unité d'Elean a une puissance-crête de 36 MW, et elle brûle 200 000 tonnes de paille par an, ramassées dans un rayon de 80 kilomètres autour de l'unité de production. Si l'on suppose qu'une telle densité est généralisable à l'ensemble du pays, le modèle d'Elean permettrait la production d'énergie de $0,002 \text{ W/m}^2$. En comptant $4\,000 \text{ m}^2$ par personne, cela fait 8 W par personne, soit **0,2 kWh/j par personne**.

Calculons tout cela encore d'une autre façon. La production nationale de paille au Royaume-Uni est de 10 millions de tonnes par an, soit 0,46 kg par jour et par personne. Avec ses 4,2 kWh par kg, cette paille stocke une quantité d'énergie chimique équivalente à 2 kWh par jour et par personne. Si toute cette paille était brûlée dans des centrales au rendement de 30 % — une hypothèse qui ne plairait guère aux éleveurs, qui utilisent déjà la paille

à d'autres fins — l'électricité produite serait de **0,6 kWh/j par personne**.

Le gaz (méthane) issu de décharges

Actuellement, l'essentiel du méthane qui s'échappe des monticules de détritus provient des matières biologiques, majoritairement des déchets alimentaires. Par conséquent, tant que nous jetterons des produits comme des aliments et des journaux, le gaz issu de décharges restera une source d'énergie renouvelable — sans compter que la combustion de ce méthane est plutôt une bonne idée du point de vue du changement climatique, puisque le méthane est un gaz à effet de serre plus important que le CO₂. Une décharge recevant 7,5 millions de tonnes de déchets ménagers par an peut produire 50 000 m³ par heure de méthane.

En 1994, les émissions de méthane des décharges étaient estimées à 0,05 m³ par personne et par jour, ce qui contient une énergie chimique de 0,5 kWh/j par personne, et qui permettrait de générer **0,2 kWh(e)/j par personne** si tout ce méthane était brûlé dans des centrales électriques avec un rendement de 40 %. A noter que depuis, des modifications de la législation ont provoqué une baisse des émissions annuelles de gaz issu des décharges, qui sont désormais environ moitié moindres.

Incinerer des déchets ménagers

SELCHP, le site de cogénération du sud-est de Londres (« *South East London Combined Heat and Power* », [www.selchp.com]) est une centrale de 35 MW que l'on paie pour brûler 420 000 tonnes par an de déchets ménagers issus des environs de Londres.

Les déchets sont incinérés tous ensemble, sans tri préalable. Après incinération, les métaux ferreux sont extraits pour être recyclés, les déchets dangereux sont filtrés et orientés vers un site de traitement spécifique, tandis que les cendres restantes sont valorisées dans des matériaux recyclés pour la construction de routes et de bâtiments. Le pouvoir calorifique des déchets est de 2,5 kWh/kg, et le rendement thermique de l'unité de cogénération est de 21 %, ce qui signifie que chaque kg de déchets brûlés permet de produire 0,5 kWh d'électricité. Les émissions de carbone sont d'environ 1 000 g de CO₂ par kWh. Sur les 35 MW produits, 4 MW environ sont autoconsommés par l'unité pour les processus de filtration et de production d'électricité.

Si on extrapolait ce projet en imaginant que toutes les villes sont équipées d'une unité comparable, et si on supposait que chacun rejette 1 kg de déchets par jour, on pourrait alors obtenir **0,5 kWh(e) par jour et par personne** de l'incinération des déchets.

Ce chiffre est proche de celui estimé précédemment pour la valorisation des gaz issus de décharges. Et rappelez-vous : on ne peut pas avoir les deux. Plus d'incinération de déchets, cela signifie moins de gaz issus de



FIGURE D.4. SELCHP — vos déchets, c'est leur affaire.

décharges. Voir la figure 27.2 (page 243) et la figure 27.3 (page 244) pour plus de détails sur l'incinération des déchets.

Notes et bibliographie

Page n°

333 *L'énergie par unité de surface pour la production d'électricité à partir de saule, de miscanthus, ou de peuplier est de 0,2 W/m²*. Source : Select Committee on Science and Technology Minutes of Evidence – Memorandum from the Biotechnology & Biological Sciences Research Council [www.publications.parliament.uk/pa/ld200304/ldselect/ldscstech/126/4032413.htm]. « En moyenne, il est possible de produire une culture durable de 10 tonnes sèches par hectare et par an de biomasse ligneuse dans le nord de l'Europe [...] Par conséquent, une surface de 1 km² produira 1 000 tonnes sèches par an — assez pour une capacité électrique de 150 kW(e) à faible taux de conversion ou de 300 kW(e) avec de hauts rendements. » Cela signifie une densité de puissance électrique comprise entre 0,15 et 0,3 W(e)/m². Voir aussi Layzell et al. (2006), [3ap71c].

– *Colza*. Sources : Bayer Crop Science (2003), Evans (2007), www.defra.gov.uk.

334 *Betterave à sucre*. Source : statistics.defra.gov.uk/esg/default.asp

– *Bioéthanol à partir de maïs*. Source : Shapouri et al. (1995).

335 *Bioéthanol cellulosique*. Voir aussi Mabey et al. (2006).

– *Jatropha*. Sources : Francis et al. (2005), Asselbergs et al. (2006).

– *Aux États-Unis, les bassins enrichis en CO₂ concentré peuvent produire 30 g par m² et par jour d'algues, et 0,01 litre par m² et par jour de biodiesel*. Source : Putt (2007). Ce calcul ignorait les consommations d'énergie liées au fonctionnement des bassins et aux étapes de transformation des algues en biodiesel. Putt décrit le bilan énergétique d'un projet de ferme algale de 40 hectares, alimenté par du méthane issu d'un digesteur de lisier. La ferme en question produirait en réalité moins d'énergie que de méthane consommé. Ce projet d'exploitation de 40 hectares devait utiliser 2 600 kW de méthane, ce qui correspond à une densité énergétique de 6,4 W/m². Pour résumer, la densité de puissance de la production de cette ferme, sous forme de biodiesel, serait seulement de 4,2 W/m². Il faut ainsi rester vigilant et considérer toutes les propositions de production de biocarburants avec un œil critique !

336 *Une étude du Laboratoire National des Energies Renouvelables estime que des algues vertes génétiquement modifiées exploitées sur une surface de 11 hectares pourraient produire 300 kg d'hydrogène par jour*. Source : Amos (2004).

337 *La centrale électrique d'Elean*. Source : Government White Paper (2003). Elean Power Station (36 MW) — la première centrale électrique britannique brûlant de la paille. *Production de paille* : www.biomassenergycentre.org.uk.



- 338 *Gaz issu de décharges*. Sources : Matthew Chester, City University, London, communication personnelle ; Meadows (1996) ; Aitchison (1996) ; Alan Rosevear, représentant britannique du *Methane to Markets Landfill Gas Sub-Committee*, mai 2005, [4hamks].

E Chauffage II

Si on pouvait construire un bâtiment parfaitement calfeutré et isolé, il retiendrait la chaleur pour toujours et n'aurait donc jamais besoin d'être chauffé. Dans la pratique, les deux principales raisons pour lesquelles les bâtiments perdent de la chaleur sont les suivantes :

1. La **conduction** — la chaleur s'écoule directement à travers les murs, les fenêtres et les portes ;
2. La **ventilation** — l'air chaud s'infiltré à travers les fissures, les trous, ou les conduits de ventilation intentionnels.

Selon le modèle standard qui décrit les pertes de chaleur, ces deux flux sont proportionnels à la différence de température entre l'air intérieur et extérieur. Pour une maison britannique typique, la conduction constitue la perte principale, comme nous allons le voir maintenant.

Pertes par conduction

Le rythme de conduction de la chaleur à travers un mur, un plafond, un plancher ou une fenêtre, est le produit de trois choses : la surface du mur, une mesure de la conductivité du mur, baptisée dans le jargon « coefficient de transfert global » ou « coefficient U », et la différence de température —

$$\text{pertes en énergie} = \text{surface} \times U \times \text{différence de température.}$$

Le coefficient U est généralement mesuré en $\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$. (Un kelvin (1 K) est identique à un degré Celsius (1°C).) Un coefficient U élevé se traduit par des pertes énergétiques élevées. Plus un mur est épais, plus son coefficient U est bas. Un double vitrage est à peu près aussi efficace qu'un mur de briques plein (voir tableau E.2).

Les coefficients U d'objets accumulés les uns contre les autres, comme un mur et son revêtement intérieur, se combinent de la même façon que les conductivités électriques :

$$u_{\text{combinaison en série}} = 1 \left/ \left(\frac{1}{u_1} + \frac{1}{u_2} \right) \right.$$

Il y a un exemple pratique utilisant cette règle en page 349.

Pertes par ventilation

Si l'on veut déterminer la quantité de chaleur nécessaire pour réchauffer l'air froid entrant, il nous faut la capacité thermique de l'air : $1,2 \text{ kJ}/\text{m}^3/\text{K}$.

Dans le métier du bâtiment, on a l'habitude de décrire les pertes provoquées par la ventilation dans un volume donné comme le produit du rythme de renouvellement horaire de l'air N , du volume V en mètres



	Coefficient U (W/m ² /K)		
	bâti ancien	standards récents	meilleures pratiques
Murs		0,45–0,6	0,12
Mur en maçonnerie solide	2,4		
Mur extérieur : brique solide, 22 cm	2,2		
Mur creux en parpaings de 28 cm	1,0		
Mur isolé en parpaings de 28 cm	0,6		
Planchers		0,45	0,14
suspendu en bois	0,7		
dalle en béton	0,8		
Toits		0,25	0,12
Toit horizontal avec 25 mm d'isolation	0,9		
Toit en pente avec 100 mm d'isolation	0,3		
Fenêtres			1,5
Simple vitrage	5,0		
Double vitrage	2,9		
Double vitrage, espace 20 mm	1,7		
Triple vitrage	0,7–0,9		

TABEAU E.2. Coefficients U de divers murs, sols, toits et fenêtres.

Cuisine	2
Salle de bain	2
Salon	1
Chambre	0,5

TABEAU E.1. Renouvellement d'air par heure : valeurs typiques de *N* pour des pièces correctement calfeutrées. Les pièces avec les pires courants d'air ont *N* = 3 changements d'air par heure. Le taux de renouvellement minimum recommandé est entre 0,5 et 1,0 renouvellement complet d'air par heure, ce qui fournit suffisamment d'air frais pour la santé humaine, pour brûler des combustibles en sécurité, et pour éviter les dégâts aux éléments du bâtiment qui pourraient résulter d'un excès d'humidité dans l'air (EST 2003).

cubes, de la capacité thermique *C*, et de la différence de température ΔT entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment.

puissance
(en watts)

=

$C \frac{N}{1 \text{ h}} \times V(\text{m}^3) \times \Delta T(\text{K})$

(E.1)

=

$(1,2 \text{ kJ/m}^3/\text{K}) \times \frac{N}{3 \text{ 600 s}} V(\text{m}^3) \times \Delta T(\text{K})$

(E.2)

=

$\frac{1}{3} NV \times \Delta T.$

(E.3)

Pertes en énergie et demande en température (degrés-jours)

Puisque l'énergie est la puissance $\times$ le temps, on peut écrire l'énergie perdue par *conduction* à travers une surface sur une courte durée comme :

énergie perdue =

surface $\times$ *U* $\times$ ($\Delta T \times$ durée),

et l'énergie perdue par *ventilation* comme :

$\frac{1}{3} NV \times (\Delta T \times$ durée).

Ces deux pertes en énergie ont la forme :

Quelque chose $\times$ ($\Delta T \times$ durée),

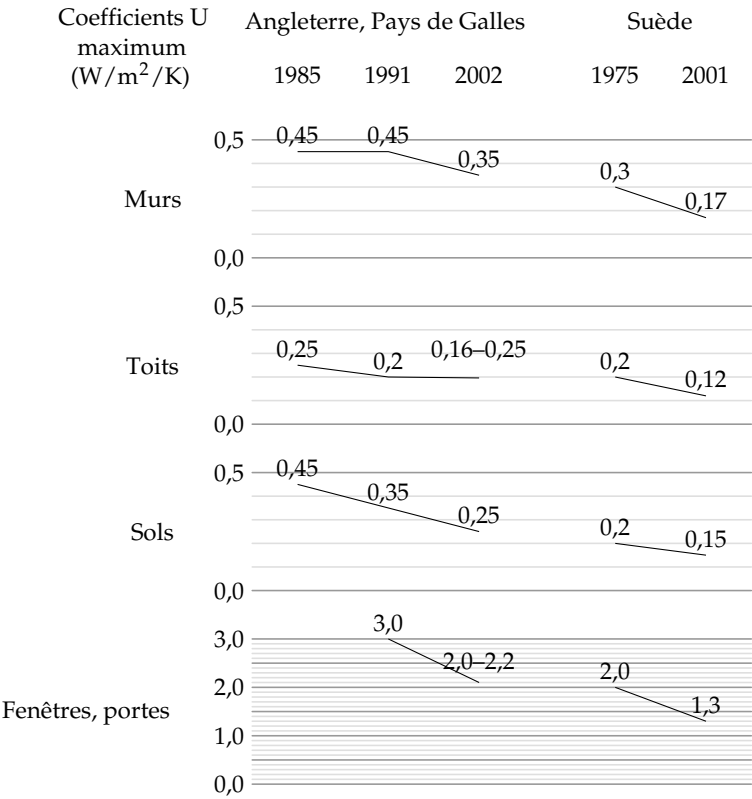


FIGURE E.3. Coefficients U exigés par la réglementation de la construction britannique et suédoise.

où le « *Quelque chose* » se mesure en watts par °C. Quand la nuit succède au jour, et au fil des saisons, la différence de température ΔT change ; on peut considérer une longue période en la fractionnant en de nombreuses petits intervalles de temps, pendant chacun desquels la différence de température est à peu près constante. D’un intervalle de temps à un autre, la différence de température change, mais les *Quelques choses* ne changent pas. Si l’on cherche à prévoir les pertes d’énergie cumulées par conduction et par ventilation sur un site donné et sur une longue période de temps, il nous faut donc multiplier deux choses :

1. la somme de tous les *Quelques choses* (en additionnant $\text{surface} \times U$ pour tous les murs, plafonds, planchers, portes et fenêtres, et $\frac{1}{3}NV$ pour le volume) ; et
2. la somme de toutes les facteurs Différence de température $\times$ durée (pour tous les intervalles de temps).

Le premier facteur est une propriété du bâtiment mesurée en watts par degré Celsius. Je l’appellerai la *déperdition* du bâtiment (on parle parfois de *coefficient de déperdition thermique* du bâtiment). Le second facteur est une propriété du temps qu’il fait ; elle est souvent exprimée en « degrés-jours », puisque la différence de température se mesure en degrés, et que les jours

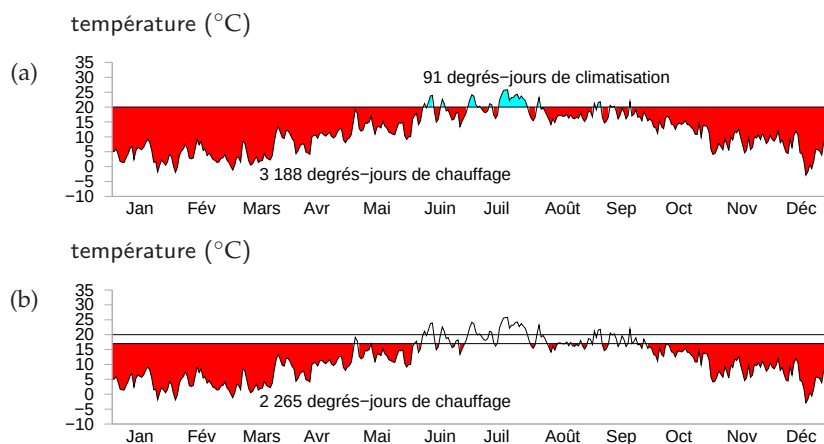


FIGURE E.4. La demande en température à Cambridge, en 2006, visualisée comme une surface sur un graphique des températures moyennes quotidiennes. (a) Thermostat réglé à 20 °C, y compris pour refroidir en été ; (b) thermostat réglé à 17 °C en hiver.

sont une unité pratique pour raisonner sur des durées. Par exemple, si l'intérieur de votre maison est à 18 °C, et si la température extérieure est de 8 °C pendant une semaine, alors on dit que cette semaine a apporté $10 \times 7 = 70$ degrés-jours à la somme ($\Delta T \times \text{durée}$). J'appellerai la somme de tous les facteurs ($\Delta T \times \text{durée}$) la *demande en température* d'une période.

énergie perdue = déperdition $\times$ demande en température.

Nous pouvons réduire nos pertes d'énergie en diminuant la déperdition du bâtiment, ou en réduisant la demande en température, ou les deux. Les deux sections suivantes examinent de plus près ces deux facteurs, en prenant comme sujet d'étude une maison à Cambridge.

Il y a un troisième facteur dont il nous faut aussi parler. L'énergie perdue est remplacée par les systèmes de chauffage du bâtiment, et par d'autres sources d'énergie tels que les occupants, leurs gadgets, leurs appareils de cuisson, et le soleil. Si l'on se focalise sur le système de chauffage, l'énergie que celui-ci *fournit* n'est pas identique à l'énergie qu'il *consomme*. Ces deux valeurs sont reliées entre elles par le *coefficient de performance* du système de chauffage.

énergie consommée = énergie fournie / coefficient de performance.

Pour une chaudière à condensation fonctionnant au gaz naturel, par exemple, le coefficient de performance est de 90 %, parce 10 % de l'énergie part dans la cheminée.

En résumé, on peut réduire la consommation d'énergie d'un bâtiment de trois manières :

1. en réduisant la demande en température ;
2. en réduisant la déperdition ; ou
3. en augmentant le coefficient de performance.

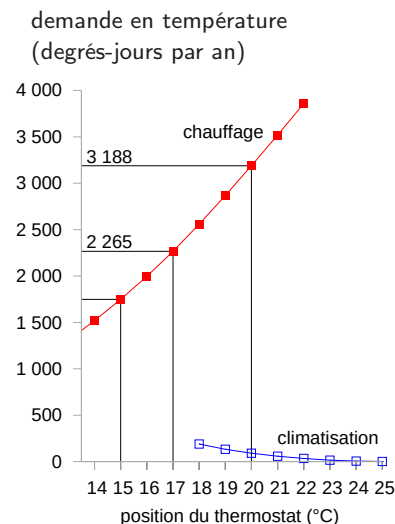


FIGURE E.5. Demande en température à Cambridge, en degrés-jours par an, en fonction du réglage du thermostat (°C). Baisser le thermostat en hiver de 20 °C à 17 °C réduit de 30 % la demande en température pour le chauffage, qui passe de 3 188 à 2 265 degrés-jours. Monter le thermostat en été de 20 °C à 23 °C réduit de 82 % la demande en température pour la climatisation, qui passe de 91 à 16 degrés-jours.

Nous allons maintenant quantifier le potentiel de chacune de ces possibilités. (Une quatrième possibilité — qui consiste à augmenter les gains en chaleur du bâtiment venant de l'extérieur, notamment du soleil — peut aussi être utile, mais je ne la traiterai pas ici.)

La demande en température

On peut visualiser aisément la demande en température sur un graphique présentant la température extérieure en fonction du temps (figure E.4). Pour un bâtiment maintenu à une température de 20 °C, la demande en température totale est la *surface* entre la ligne horizontale à 20 °C et la température extérieure. Sur la figure E.4a, on constate que, pour une année entière, à Cambridge, maintenir une température de 20 °C induit une demande en température de 3 188 degrés-jours de chauffage et de 91 degrés-jours de rafraîchissement. Ces graphiques nous permettent facilement d'estimer l'effet d'une baisse du thermostat et de l'absence de climatisation. En baissant le thermostat à 17 °C pendant l'hiver, la demande en température pour le chauffage chute de 3 188 degrés-jours à 2 265 degrés-jours (figure E.4b), ce qui correspond à une réduction de 30 % de demande en chauffage. En baissant le thermostat à 15 °C, la demande en température passe de 3 188 degrés-jours à 1 748 degrés-jours, soit une réduction de 45 %.

Ces calculs nous donnent une indication grossière de ce que l'on gagne en baissant le thermostat, mais cela ne nous en donnera une prévision exacte qu'à condition de prendre en compte deux éléments supplémentaires : tout d'abord, les bâtiments absorbent naturellement l'énergie qui provient du Soleil, ce qui rend la température intérieure plus élevée que la température extérieure, même en absence de tout chauffage ; ensuite, les occupants et leurs gadgets émettent de la chaleur, ce qui réduit d'autant plus les besoins en chauffage artificiel. La demande en température d'un lieu donné, exprimée de façon conventionnelle en degrés-jours, n'est pas très pratique à manipuler. Pour ma part, j'ai du mal à me rappeler des chiffres tels que « 3 500 degrés-jours ». On peut rendre cette quantité plus intelligible et peut-être plus facile à utiliser en la divisant par 365, qui est le nombre de jours dans l'année : on obtient alors la demande en température exprimée en « degrés-jours par jour » ou, si vous préférez, en « degrés », tout simplement. La figure E.6 nous montre cette demande en température retracée. Exprimée ainsi, la demande en température est simplement la *moyenne* de la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur. Les demandes en température soulignées sont : 8,7 °C, pour un thermostat réglé à 20 °C ; 6,2 °C, pour un réglage à 17 °C ; et 4,8 °C, pour un réglage à 15 °C.

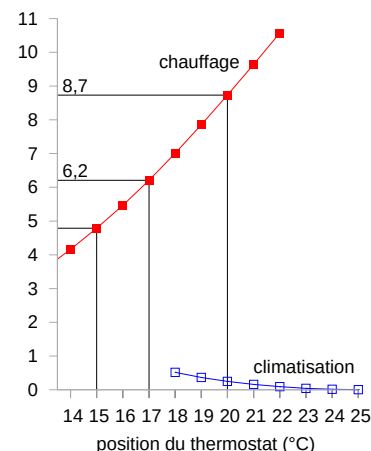


FIGURE E.6. La demande en température à Cambridge, en 2006, retracée en degrés-jours par jour, autrement dit en degrés. Dans cette unité, la demande en température est simplement la moyenne de la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur.

DÉPERDITION PAR CONDUCTION	surface (m ²)	coefficient U (W/m ² /°C)	déperdition (W/°C)
Surfaces horizontales			
Toit en pente	48	0,6	28,8
Toit horizontal	1,6	3	4,8
Plancher	50	0,8	40
Surfaces verticales			
Murs de l'extension	24,1	0,6	14,5
Murs principaux	50	1	50
Murs fins (8 cm)	2	3	6
Portes & fenêtres, simple vitrage	7,35	5	36,7
Fenêtres, double vitrage	17,8	2,9	51,6
Déperdition totale par conduction			232,4

DÉPERDITION PAR VENTILATION	volume (m ³)	N (renouv. d'air par heure)	déperdition (W/°C)
Chambres	80	0,5	13,3
Cuisine	36	2	24
Hall d'entrée	27	3	27
Autres pièces	77	1	25,7
Déperdition totale par ventilation			90

TABLEAU E.7. Analyse des déperditions de ma maison par conductivité et par ventilation, avant 2006.

J’ai traité le mur séparateur de la maison mitoyenne comme un mur parfaitement isolé, mais cette hypothèse pourrait être fausse dans le cas où l’espace entre maisons adjacentes est bien ventilé.

J’ai fait ressortir les paramètres sur lesquels j’ai agi après 2006, grâce à des modifications que je décrirai plus loin.

La déperdition — à travers un exemple, ma maison

Ma maison est un pavillon mitoyen avec trois chambres bâti vers 1940 (figure E.8). En 2006, la cuisine a été un peu agrandie, et la plupart des fenêtres ont reçu un double vitrage. Les portes avant et arrière étaient encore toutes les deux en simple vitrage.

Le tableau E.7 montre le résultat de mon estimation de la déperdition thermique de ma maison, faite en 2006. La déperdition totale était de 322 W/°C (ou 7,7 kWh/j/°C), dont 72 % étaient dus à la déperdition par conduction, et 28 % à la déperdition par ventilation. La déperdition par conduction est divisée en trois parties à peu près égales : les fenêtres ; les murs ; le sol et le plafond.

Pour comparer la déperdition de deux bâtiments avec des surfaces au sol différentes, on peut diviser la déperdition par la surface au sol ; cela nous donne le *paramètre de pertes thermiques* du bâtiment, que l’on mesure en W/°C/m². Le paramètre de pertes thermiques de cette maison (qui a une surface totale au sol de 88 m²) est de :

$3,7 \text{ W/°C/m}^2.$

Utilisons maintenant ces chiffres pour estimer la consommation d’énergie quotidienne de la maison, durant une froide journée d’hiver, et sur



FIGURE E.8. Ma maison.

l'année entière.

Par un jour froid, en supposant que la température extérieure soit de -1°C et que la température intérieure soit de 19°C , la différence de température est alors égale à $\Delta T = 20^{\circ}\text{C}$. Si cette différence est maintenue pendant 6 heures par jour, alors l'énergie perdue par jour est de :

$$322 \text{ W}/^{\circ}\text{C} \times 120 \text{ degrés-heures} \simeq 39 \text{ kWh.}$$

Si la température est maintenue à 19°C 24 heures sur 24, l'énergie perdue par jour est de :

$$155 \text{ kWh/j.}$$

Pour obtenir un chiffre de pertes de chaleur sur l'année entière, on peut prendre la demande en température de Cambridge de la figure E.5. Avec un thermostat à 19°C , la demande en température en 2006 était de 2 866 degrés-jours. Le taux moyen de pertes de chaleur, si la maison est toujours gardée à 19°C , est donc de :

$$7,7 \text{ kWh/j}/^{\circ}\text{C} \times 2\,866 \text{ degrés-jours/an} / (365 \text{ jours/an}) = 61 \text{ kWh/j.}$$

En baissant le thermostat à 17°C , le taux moyen de pertes de chaleur chute à 48 kWh/j. En le montant à une température tropicale de 21°C , les pertes moyennes de chaleur sont de 75 kWh/j.

Résultats d'une isolation plus poussée

Durant l'année 2007, j'ai apporté les modifications suivantes à la maison :

1. Isolation des cavités muralesI (ce qui manquait pour les murs principaux de la maison) — figure 21.5.
2. Augmentation de l'isolation du toit.
3. Ajout d'une nouvelle porte d'entrée à l'extérieur de l'ancienne porte — figure 21.6.
4. Remplacement de la porte arrière par une porte avec double vitrage.
5. Pose d'un double vitrage sur la seule fenêtre qui avait encore un simple vitrage.

Quel changement peut-on prévoir concernant les pertes de chaleur ?

La déperdition totale avant les changements était de $322 \text{ W}/^{\circ}\text{C}$.

L'ajout de l'isolation des cavités murales (nouveau coefficient U de 0,6) aux murs principaux réduit la déperdition de la maison de $20 \text{ W}/^{\circ}\text{C}$. L'isolation améliorée du grenier (nouveau coefficient U de 0,3) devrait réduire la déperdition de $14 \text{ W}/^{\circ}\text{C}$. Les modifications du vitrage (nouveau coefficient U de 1,6 à 1,8) devrait réduire la déperdition par conduction de $23 \text{ W}/^{\circ}\text{C}$, et la déperdition par ventilation de quelque chose comme $24 \text{ W}/^{\circ}\text{C}$. En tout, cela fait une réduction de la déperdition de 25 %, qui

passer en gros de 320 à 240 W/°C (de 7,7 à 6 kWh/j/°C). Le tableau E.9 indique les économies prévues pour chaque modification.

Le paramètre de pertes thermiques de cette maison (d'une surface totale au sol de 88 m²) est donc en principe réduit d'environ 25 %, passant de 3,7 à 2,7 W/°C/m². (On est encore loin des 1,1 W/°C/m² requis pour une maison « durable » selon le nouveau code de la construction.)

Que la difficulté d'obtenir une réduction sérieuse de la déperdition d'une maison déjà construite peut être frustrante ! Comme on l'a vu précédemment, un moyen beaucoup plus facile de réduire sérieusement les pertes de chaleur consiste à baisser le thermostat. Le baisser de 20 à 17 °C donnait une réduction de 30 % des pertes de chaleur.

En combinant ces deux actions — les modifications physiques et la baisse du thermostat — ce modèle prévoit que les pertes en chaleur devraient être diminuées de près de 50 %. Dans la mesure où l'ensoleillement, les gadgets et les humains génèrent de la chaleur dans une maison, la baisse de la consommation de gaz devrait être supérieure à 50 %.

J'ai apporté tous ces changements à ma maison et j'ai regardé mes compteurs chaque semaine. Je peux confirmer que ma facture de chauffage a effectivement baissé de plus de 50 %. Comme le montrait la figure 21.4, ma consommation de gaz a chuté de 40 kWh/j à 13 kWh/j — c'est-à-dire une réduction de 67 %.

Réduire les déperditions par des revêtements muraux intérieurs

Est-ce que vous pouvez réduire la déperdition de vos murs en couvrant leur *intérieur* avec un isolant ? La réponse est oui, mais il peut y avoir deux complications. Tout d'abord, l'épaisseur du revêtement intérieur est supérieure à ce que vous pourriez imaginer. Pour transformer un mur existant, construit en brique pleine, de 23 cm d'épaisseur (coefficient U de 2,2 W/m²/K) en un mur décemment isolé à 0,3 W/m²/K, il faut ajouter environ 6 cm de panneau isolant [65h3cb]. Par ailleurs, de la condensation peut apparaître sur la face intérieure de ces couches isolantes, provoquant des problèmes d'humidité.

Si vous ne cherchez pas à atteindre une réduction aussi importante de la déperdition de vos murs, vous pouvez vous en sortir avec un isolant plus mince. Par exemple, vous pouvez acheter des panneaux muraux isolants

– Isolation des murs creux (applicable aux deux tiers de la surface des murs)	4,8 kWh/j
– Amélioration de l'isolation du toit	3,5 kWh/j
– Réduction de la conduction en passant en double vitrage deux portes et une fenêtre	1,9 kWh/j
– Réduction de la ventilation du couloir et de la cuisine en améliorant les portes et les fenêtres	2,9 kWh/j

TABLEAU E.9. Analyse des réductions prévues de pertes de chaleur dans ma maison, durant une froide journée d'hiver.

épais de 1,8 cm avec un coefficient U de $1,7 \text{ W/m}^2/\text{K}$. En le recouvrant de tels panneaux, le coefficient U de votre mur serait réduit de $2,2 \text{ W/m}^2/\text{K}$ à :

$$1 / \left(\frac{1}{2,2} + \frac{1}{1,7} \right) \simeq 1 \text{ W/m}^2/\text{K}.$$

Sans aucun doute, une réduction digne d'intérêt.

L'échange d'air

Une fois un bâtiment vraiment bien isolé, les principales pertes de chaleur proviennent de la ventilation (du renouvellement de l'air) plutôt que de la conduction. La chaleur perdue par ventilation peut être réduite en transférant la chaleur de l'air sortant à l'air entrant. De façon tout à fait remarquable, une bonne partie de cette chaleur peut effectivement être transférée sans avoir besoin d'aucune énergie additionnelle. L'astuce consiste à utiliser un nez, comme l'a découvert la sélection naturelle. Un nez réchauffe l'air entrant en refroidissant l'air sortant. Il y a un gradient de température le long du nez ; les murs du nez sont les plus froids à proximité des narines. Plus votre nez est long, mieux il fonctionne comme un échangeur de chaleur à contre-courant. Dans les nez naturels, la direction du flux d'air est généralement alternée. Une autre façon de concevoir un nez est d'avoir deux voies aériennes, une pour le flux entrant, et une pour le flux sortant, séparées du point de vue de l'air, mais étroitement accolées l'une à l'autre afin que la chaleur puissent aisément s'écouler entre les deux conduits. C'est ainsi que fonctionnent les nez dans les bâtiments. Par convention, on appelle ces nez des échangeurs de chaleur.

Une maison économe en énergie

En 1984, un consultant en énergie, Alan Foster, a construit une maison économe en énergie près de Cambridge ; il m'a aimablement donné ses mesures détaillées. La maison est un bungalow à charpente en bois basée sur une conception scandinave appelée « Heatkeeper Serrekunda » (figure E.10) ; elle a une surface au sol de 140 m^2 , et comprend trois chambres, un bureau, deux salles de bains, un salon, une cuisine, et un vestibule. Les murs extérieurs en bois ont été fournis en kit par une société écossaise, et le gros œuvre de la maison n'a pris que quelques jours pour être assemblé.

Les murs font 30 cm d'épaisseur et leur coefficient U est de $0,28 \text{ W/m}^2/^\circ\text{C}$. En allant de l'intérieur jusqu'à l'extérieur, ils sont constitués de 13 mm de panneau de placoplâtre, d'une couche d'air de 27 mm, d'une couche de protection contre la condensation, de 8 mm de contre-plaqué, de 90 mm de laine de roche, de 12 mm de panneau de fibre de bois imprégnée de bitume, de 50 mm creux, et de 103 mm de brique. La construction du plafond est similaire, à laquelle a été ajoutée entre 100 et 200 mm d'isolation avec de la laine de roche. Le plafond a un coefficient U de $0,27 \text{ W/m}^2/^\circ\text{C}$,

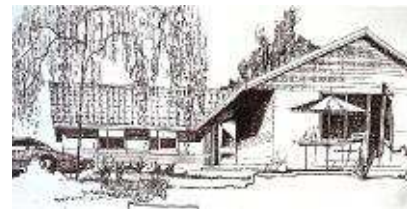


FIGURE E.10. La maison « Heatkeeper » Serrekunda.

et le plancher, $0,22 \text{ W/m}^2/^{\circ}\text{C}$. Les fenêtres sont en double vitrage (coefficient U de $2 \text{ W/m}^2/^{\circ}\text{C}$), avec un traitement spécial de la surface extérieure du vitrage intérieur de façon à réduire le rayonnement de chaleur. Les fenêtres sont disposées de façon à apporter un gain solaire substantiel, et contribuer ainsi à environ 30 % de l'apport en chauffage de la maison.

La maison est bien calfeutrée, chaque porte et chaque fenêtre étant bordée d'un joint en néoprène. La maison est chauffée par de l'air chaud pompé à travers des grilles dans le sol ; en hiver, les pompes retirent l'air usagé de plusieurs pièces, le rejetant à l'extérieur, et prenant l'air dans le grenier. L'air entrant et l'air sortant traversent un échangeur de chaleur (figure E.11), qui récupère 60 % de la chaleur dans l'air sortant. L'échangeur de chaleur est un système passif, qui ne consomme pas d'énergie ; c'est comme un grand nez en métal, qui réchauffe l'air entrant avec l'air sortant. Un jour d'hiver vraiment froid, où la température extérieure était de -8°C , la température au niveau de la prise d'air du grenier était de 0°C , et l'air sortant de l'échangeur de chaleur était à $+8^{\circ}\text{C}$.

Pendant les dix premières années, la chaleur provenait entièrement de radiateurs électriques, chauffant une réserve de chaleur de 600 litres la nuit pendant les heures creuses. Plus récemment, la maison a été reliée au gaz de ville, et le chauffage de la maison provient maintenant d'une chaudière à condensation.

Les pertes de chaleur par conduction et ventilation est de $4,2 \text{ kWh/j/^{\circ}\text{C}}$. Le *paramètre de pertes thermiques* (la déperdition par mètre carré de surface au sol) est de $1,25 \text{ W/m}^2/^{\circ}\text{C}$ (à comparer avec celui de ma maison : $2,7 \text{ W/m}^2/^{\circ}\text{C}$).

La maison étant occupée par deux personnes, la consommation de chauffage moyenne, avec un thermostat réglé à 19 ou 20°C durant la journée, était de $8\,100 \text{ kWh}$ par an, soit 22 kWh/j ; la consommation énergétique totale tous usages confondus était d'environ $15\,000 \text{ kWh}$ par an, soit 40 kWh/j . Exprimé sous la forme d'une puissance moyenne par unité de surface, cela fait $6,6 \text{ W/m}^2$ pour le chauffage et $12,2 \text{ W/m}^2$ au total.

La figure E.12 compare la consommation de puissance par unité de surface de cette maison « Heatkeeper » avec celle de ma propre maison (avant et après mes améliorations) et avec la moyenne européenne. La consommation de ma maison après améliorations est proche de celle de la maison « Heatkeeper », grâce à mon thermostat réglé à un niveau plus bas.



FIGURE E.11. L'échangeur de chaleur de la maison Heatkeeper.

Références pour les maisons et les bureaux

Le standard allemand de Maison passive vise une consommation énergétique pour le chauffage et le refroidissement de 15 kWh/m^2 par an, soit une densité moyenne de puissance de $1,7 \text{ W/m}^2$; et une consommation énergétique totale de 120 kWh/m^2 par an, soit $13,7 \text{ W/m}^2$ en moyenne.

La consommation de puissance moyenne du secteur des services dans le Royaume-Uni, par unité de surface au sol, est de 30 W/m^2 .

Un bureau économe en énergie

La *National Energy Foundation* britannique s'est construit un bâtiment à faible coût et faible consommation d'énergie. Ce dernier possède des panneaux solaires pour l'eau chaude, des panneaux photovoltaïques qui génèrent jusqu'à 6,5 kW d'électricité, et il est chauffé par une pompe à chaleur géothermique et de temps en temps par un poêle à bois. Sa surface au sol est de 400 m², pour environ 30 occupants. C'est un bâtiment à un seul étage. Les murs contiennent 300 mm d'isolation par laine de roche. Le coefficient de performance de la pompe à chaleur en hiver est de 2,5. L'énergie consommée est de 65 kWh par an par m² de surface (7,4 W/m²), dont environ 20 % sont produits par le système photovoltaïque.

Bureaux contemporains

On vante fréquemment les qualités environnementales fantastiques des immeubles de bureaux de construction très récente. Jetons un coup d'œil sur quelques chiffres.

Le bâtiment William Gates de l'université de Cambridge abrite des chercheurs en informatique, des administratifs, et un petit café. Sa surface est de 11 110 m², et il consomme 2 392 MWh/an d'énergie. Cela fait une puissance par unité de surface de 215 kWh/m²/an, soit 25 W/m². Ce bâtiment a remporté un prix RIBA en 2001 pour sa consommation énergétique prévue. « Les architectes ont incorporé de nombreux éléments améliorant l'impact environnemental dans le bâtiment ». [5dhups]

Mais faut-il vraiment se laisser impressionner par ces bâtiments ? Juste à côté, l'immeuble Rutherford, construit pendant les années 1970 sans aucune prétention écologique — il n'a même pas de double vitrage — fait 4 998 m² et consomme 1 557 MWh par an ; ce qui fait 0,85 kWh/j/m², ou 36 W/m². Autrement dit, en puissance consommée par unité de surface, l'immeuble primé n'est que 30 % meilleur que son cousin basique des années 70. La figure E.12 compare ces bâtiments et un autre bâtiment récent, celui de la Faculté de Droit, aux Vieilles écoles, qui sont d'anciens bureaux construits avant 1890. Malgré les annonces en fanfare, la différence entre le récent et l'ancien est en fait bien décevante !

Remarquez que les consommations de puissance des bâtiments, par unité de surface, sont exprimées précisément dans les mêmes unités (W/m²) que les productions par unité de surface d'énergie renouvelable que nous avons décrites pages 52, 55, et 209. Mettre côte à côte ces consommations et les chiffres pour la production permet de prendre conscience à quel point il serait difficile d'alimenter entièrement des bâtiments modernes avec des énergies renouvelables qui seraient produites sur place. La puissance par unité de surface des biocarburants (figure 6.12, page 52) est de 0,5 W/m² ; celles des fermes éoliennes, de 2 W/m² ; celle du photovoltaïque, de 20 W/m² (figure 6.18, page 55) ; seuls les panneaux solaires

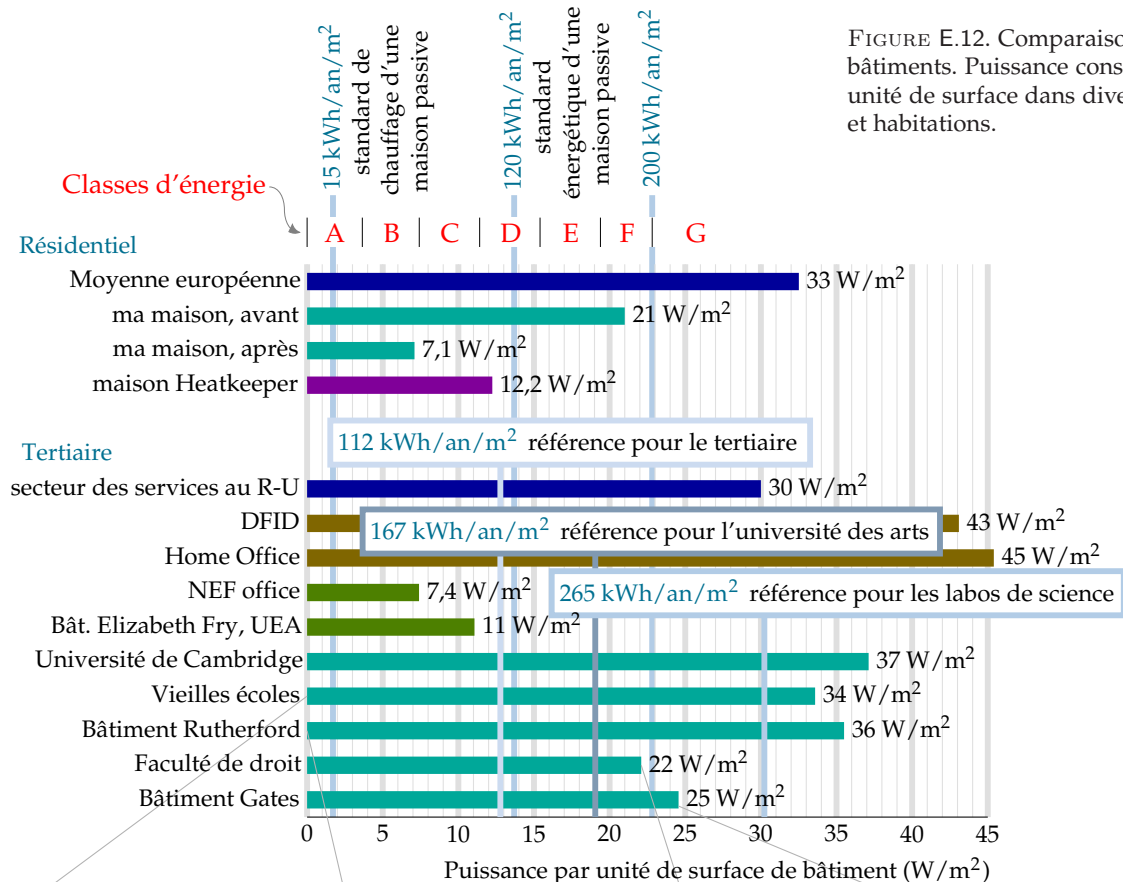


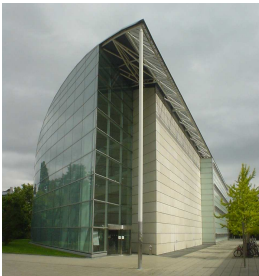
FIGURE E.12. Comparaisons de bâtiments. Puissance consommée par unité de surface dans divers bureaux et habitations.



Vieilles écoles



Bâtiment Rutherford



Faculté de droit



Bâtiment Gates

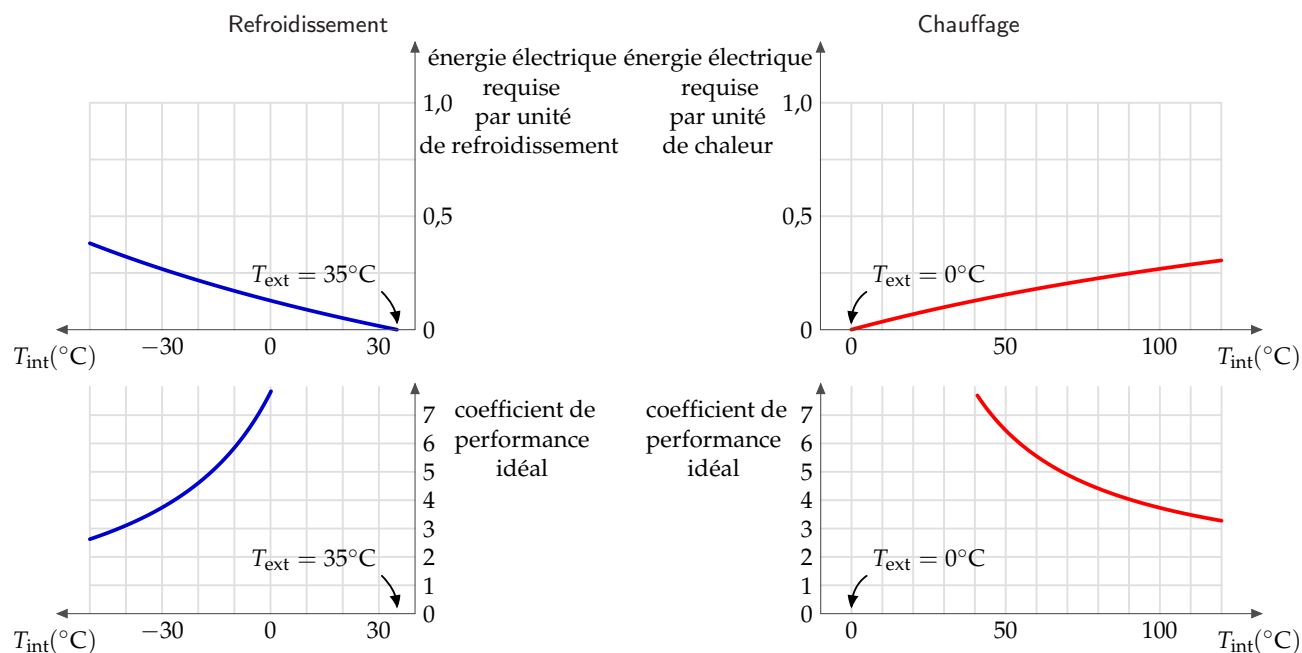


FIGURE E.13. Rendements de pompes à chaleur idéales. En haut à gauche : l'énergie électrique qui serait nécessaire dans l'idéal, selon les limites de la thermodynamique, pour pomper de la chaleur en *dehors* d'un endroit à la température T_{int} , quand la chaleur est pompée à un endroit à la température $T_{\text{ext}} = 35^\circ\text{C}$. A droite : l'énergie électrique qui serait nécessaire dans l'idéal pour pomper de la chaleur *vers* un endroit à la température T_{int} , quand la chaleur est pompée depuis un endroit à la température $T_{\text{ext}} = 0^\circ\text{C}$. Ligne du bas : par convention, le rendement est exprimé sous forme d'un « coefficient de performance », qui représente la chaleur pompée par unité d'énergie électrique. En pratique, à ce que j'ai compris, les pompes à chaleur géothermiques bien installées et les meilleures pompes à chaleur air-air ont généralement un coefficient de performance de 3 ou 4 ; cependant, les règlements gouvernementaux au Japon ont poussé le coefficient de performance jusqu'à 6,6.

thermiques nous amènent à peu près dans la bonne gamme de densités de puissance : 53 W/m^2 (figure 6.3, page 46).

Améliorer le coefficient de performance

Vous avez peut-être l'impression que le coefficient de performance d'une chaudière à condensation, qui est de 90 %, sera difficile à battre. Mais on peut nettement l'améliorer avec des pompes à chaleur. Tandis que la chaudière à condensation utilise de l'énergie chimique et en transforme 90 % en chaleur utile, la pompe à chaleur utilise de l'énergie électrique et s'en sert pour *déplacer* de la chaleur d'un endroit à un autre (par exemple, de l'extérieur à l'intérieur d'un bâtiment). En général, la quantité de chaleur utile fournie est largement supérieure à la quantité d'électricité consommée. Un coefficient de performance de 3 ou 4 est quelque chose de tout à fait normal.

La théorie des pompes à chaleur

Voici les formules qui donnent le rendement idéal d'une pompe à chaleur, c'est-à-dire la quantité d'énergie électrique requise par unité de chaleur pompée. Si l'on pompe de la chaleur à partir d'une zone extérieure à la température T_1 vers une zone à une température supérieure T_2 , les deux températures étant exprimées par rapport au zéro absolu (autrement dit, T_2 , en kelvins, se déduit de la température en degrés Celsius T_{int} en y

ajoutant 273,15), le rendement idéal est égal à :

$$\text{rendement} = \frac{T_2}{T_2 - T_1}.$$

Si l'on pompe de la chaleur hors d'un endroit à la température T_2 vers un extérieur plus chaud à la température T_1 , le rendement idéal est égal à :

$$\text{rendement} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}.$$

Ces limites théoriques ne peuvent être atteintes que par des systèmes qui pomperaient la chaleur de façon infiniment lente. Remarquez que plus la température intérieure T_2 est proche de la température extérieure T_1 , plus le rendement idéal est élevé.

Bien que, en théorie, des pompes à chaleur exploitant la chaleur du sol puissent avoir une meilleure performance que celles utilisant la chaleur de l'air, puisque la température du sol est en général plus proche de la température intérieure que celle de l'air, en pratique une pompe à chaleur air-air pourrait bien constituer le meilleur et le plus simple des choix. Dans les grandes villes, il n'est pas sûr que les pompes à chaleur sol-air soit le choix le plus judicieux à long terme, car plus les gens qui s'en servent en hiver sont nombreux, plus le sol devient froid ; ce problème de décharge thermique sauvage pourrait aussi apparaître en été dans les villes où un trop grand nombre de bâtiments auraient recours à des pompes à chaleur sol-air (ou devrais-je dire « puits-air » ?) pour la climatisation.

Le chauffage et le sol

Voici un calcul intéressant à faire. Imaginez que vous ayez des panneaux solaires thermiques sur votre toit et que, dès que l'eau dans les panneaux dépasse les 50 °C, vous pompiez l'eau à travers un gros rocher sous votre maison. Quand arrivent les mois gris, mornes et froids, vous pourriez alors utiliser la chaleur contenue dans ce rocher pour chauffer votre maison. En gros, quelle taille devrait avoir un rocher à 50 °C pour stocker assez de chaleur pour chauffer une maison pendant un mois entier ? Supposons que l'on souhaite obtenir 24 kWh par jour pendant 30 jours et que la maison soit à 16 °C. La capacité calorifique du granite est égale à $0,195 \times 4\,200 \text{ J/kg/K} = 820 \text{ J/kg/K}$. La masse de granite nécessaire est donc égale à :

$$\begin{aligned} \text{masse} &= \frac{\text{énergie}}{\text{capacité calorifique} \times \text{différence de température}} \\ &= \frac{24 \times 30 \times 3,6 \text{ MJ}}{(820 \text{ J/kg/}^\circ\text{C}) \times (50^\circ\text{C} - 16^\circ\text{C})} \\ &= 100\,000 \text{ kg,} \end{aligned}$$

soit 100 tonnes, ce qui correspond à un rocher en forme de pavé, d'une taille de 6 m × 6 m × 1 m.

Capacité calorifique :	$C = 820 \text{ J/kg/K}$
Conductivité :	$\kappa = 2,1 \text{ W/m/K}$
Densité :	$\rho = 2\,750 \text{ kg/m}^3$
Capacité calorifique par unité de volume :	$C_V = 2,3 \text{ MJ/m}^3/\text{K}$

TABLEAU E.14. Statistiques fondamentales du granite (j'ai pris le granite comme exemple de roche typique).

Stockage dans le sol sans paroi

OK, nous avons déterminé la taille d’une réserve utile dans le sol. Mais est-il difficile de conserver la chaleur ? Aurait-on besoin d’envelopper notre rocher en forme de très gros pavé d’une épaisse couche isolante ? En fait, il s’avère que le sol lui-même est un assez bon isolant. Un pic de chaleur envoyé dans un trou dans le sol s’y diffusera selon la formule :

$$\frac{1}{\sqrt{4\pi\kappa t}} \exp\left(-\frac{x^2}{4(\kappa/(C\rho))t}\right)$$

où κ est la conductivité du sol, C sa capacité calorifique, et ρ sa densité. Cette expression décrit une courbe en cloche de largeur égale à :

$$\sqrt{2\frac{\kappa}{C\rho}t};$$

par exemple, après six mois ($t = 1,6 \times 10^7$ s), en utilisant les valeurs du granite ($C = 0,82$ kJ/kg/K, $\rho = 2\,500$ kg/m³, $\kappa = 2,1$ W/m/K), la largeur est de **6 mètres**.

En utilisant les chiffres pour l’eau ($C = 4,2$ kJ/kg/K, $\rho = 1\,000$ kg/m³, $\kappa = 0,6$ W/m/K), la largeur est de 2 mètres.

Donc si la zone de stockage est plus grande que 20 m × 20 m × 20 m alors la majorité de la chaleur stockée y sera toujours six mois plus tard (car 20 mètres sont significativement plus grands que 6 mètres et 2 mètres).

Les limites des pompes à chaleur géothermiques

La faible conductivité thermique du sol est à double tranchant. Grâce à sa faible conductivité, le sol retient bien la chaleur pendant longtemps. Mais par ailleurs, cette faible conductivité signifie qu’il n’est pas facile de déplacer rapidement de la chaleur vers et en provenance du sol. Explorons maintenant de quelle façon la conductivité du sol limite l’utilité des pompes à chaleur géothermiques.

Considérons un quartier avec une densité de population vraiment élevée. Est- ce que *tout le monde* peut utiliser des pompes à chaleur géothermiques, sans avoir recours à un remplacement actif en été (tel que décrit

	(W/m/K)
eau	0,6
quartz	8
granite	2,1
croûte terrestre	1,7
terre sèche	0,14

TABLEAU E.15. Conductivités thermiques. Pour plus de données, voir le tableau E.18, page 357.

température (°C)

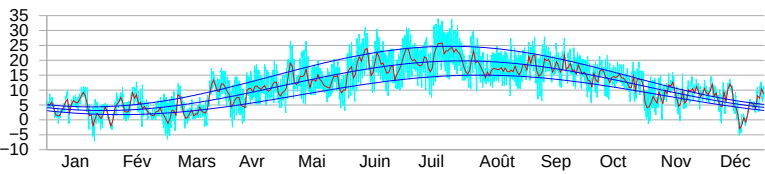


FIGURE E.16. La température à Cambridge, en 2006, et un schéma, qui nous donne la température comme la somme d’une variation annuelle sinusoïdale entre 3 °C et 20 °C, et d’une variation sinusoïdale quotidienne avec un intervalle jusqu’à 10,3 °C. La température moyenne est 11,5 °C.

en page 181)? Le souci vient du fait que si nous aspirons tous de la chaleur du sol en même temps, on pourrait faire geler le sol. Je vais traiter cette question avec deux calculs. Premièrement, je vais calculer le flux naturel d'énergie qui va vers et part du sol en été et en hiver. Si le flux que nous voulons aspirer du sol en hiver est bien plus élevé que ces flux naturels, alors nous saurons que notre aspiration va altérer les températures du sol de manière significative, et qu'elle pourrait donc ne pas être faisable. Pour ce calcul, je vais supposer que le sol qui se trouve juste sous la surface est maintenu, par les influences combinées du soleil, de l'air, des nuages et du ciel nocturne, à une température qui augmente et diminue lentement pendant l'année (figure E.16).

La réponse aux variations de température extérieure

Pour établir la réponse de la température dans le sol par le calcul, et déterminer quel est le flux entrant ou sortant, il faut un peu de mathématiques avancées, que j'ai rassemblées dans le cadre E.19 (page 359).

On est récompensé de tous ces calculs par un fort beau diagramme (figure E.17) qui indique comment la température varie dans le temps à chaque profondeur. Ce diagramme montre la réponse de n'importe quel matériau en prenant comme unité sa *dimension caractéristique* z_0 (équation E.7), qui dépend de la conductivité du matériau κ et de sa capacité calorifique C_V , ainsi que de la fréquence des variations de température extérieure ω . (On peut choisir de considérer soit les variations quotidiennes, soit les variations annuelles avec la même théorie). A une profondeur de $2z_0$, les variations en température ont une amplitude d'un septième de celles en surface, et sont en retard sur celle-ci d'environ un tiers de cycle (figure E.17). A une profondeur de $3z_0$, les variations de température ne valent plus qu'un vingtième de celles en surface, et sont décalées d'un demi-cycle.

Dans le cas des variations quotidiennes et du granite solide, la dimension caractéristique est de $z_0 = 0,16$ m. (Il vous donc faut une épaisseur de roche de 32 cm pour dompter les oscillations de température quotidiennes). Pour des variations annuelles et avec du granite, la dimension caractéristique est de $z_0 = 3$ m.

Concentrons-nous sur les variations annuelles ; ensuite, nous parlerons de deux ou trois autres choses. Les dimensions caractéristiques pour divers matériaux sont indiquées dans la troisième colonne du tableau E.18. Pour des sols sableux humides ou pour du béton, la dimension caractéristique z_0 est similaire à celle du granite — environ 2,6 m. Avec des sols secs ou tourbeux, la dimension caractéristique z_0 est plus courte — environ 1,3 m. Cela semble une bonne nouvelle, car cela signifie que vous n'aurez pas besoin de creuser aussi profond pour atteindre un terrain avec une température stable. Mais cela s'accompagne d'une mauvaise nouvelle : les flux naturels sont plus faibles dans les sols secs.

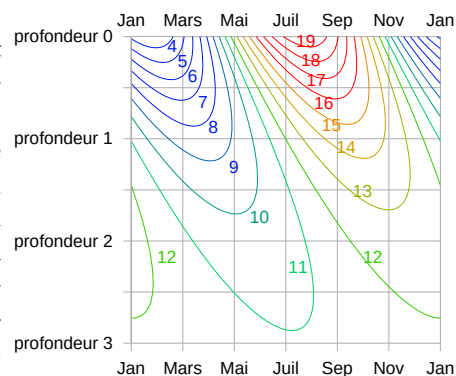


FIGURE E.17. La température (en °C) en fonction de la profondeur et du temps. Les profondeurs sont indiquées en un multiple de la dimension caractéristique z_0 , qui, pour le granite et des variations annuelles, est de 3 mètres.

A une « profondeur 2 » (6 mètres), la température est toujours environ 11 ou 12 °C. A une « profondeur 1 » (3 mètres), elle oscille entre 8 et 15 °C.

Les flux naturels varient au cours de l’année ; plus la conductivité est faible, plus la valeur maximale qu’ils atteignent est basse (équation E.9).

Dans le cas du granite, le flux maximal s’élève à 8 W/m². Pour des sols secs, le flux maximal va de 0,7 W/m² à 2,3 W/m². Pour des sols humides, le flux maximal va de 3 W/m² à 8 W/m².

Qu’est-ce que cela implique ? Je suggère que nous prenions comme référence utile un flux dans la moyenne de ces valeurs, disons 5 W/m², ce qui nous donne une indication sur l’ordre de grandeur de la puissance que l’on peut espérer extraire, par unité de surface, avec une pompe à chaleur géothermique. Si on aspire un flux nettement plus faible que 5 W/m², la perturbation que nous ajouterons aux flux naturels sera petite. Si, au contraire, on essaie d’aspirer un flux plus élevé que 5 W/m², alors il faut s’attendre à faire dévier de manière significative la température du sol de sa valeur naturelle ; dans la durée, de tels flux pourraient bien s’avérer impossibles à maintenir.

La densité de population d’une banlieue anglaise typique correspond à 160 m² par personne (rangées de maisons mitoyennes avec environ 400 m² par maison, en incluant les trottoirs et les rues). Avec une telle densité d’espace résidentiel, on peut en déduire à la louche que la limite du débit des pompes à chaleur est de :

$$5 \text{ W/m}^2 \times 160 \text{ m}^2 = 800 \text{ W} = 19 \text{ kWh/j par personne.}$$

	conductivité thermique κ (W/m/K)	capacité calorifique C_V (MJ/m ³ /K)	dimension caractérist. z_0 (m)	flux $A\sqrt{C_V\kappa\omega}$ (W/m ²)
Air	0,02	0,001 2		
Eau	0,57	4,18	1,2	5,7
Granite	2,1	2,3	3,0	8,1
Béton	1,28	1,94	2,6	5,8
<i>Sol sableux</i>				
Sec	0,30	1,28	1,5	2,3
Saturé à 50 %	1,80	2,12	2,9	7,2
Saturé à 100 %	2,20	2,96	2,7	9,5
<i>Sol argileux</i>				
Sec	0,25	1,42	1,3	2,2
Saturé à 50 %	1,18	2,25	2,3	6,0
Saturé à 100 %	1,58	3,10	2,3	8,2
<i>Sol tourbeux</i>				
Sec	0,06	0,58	1,0	0,7
Saturé à 50 %	0,29	2,31	1,1	3,0
Saturé à 100 %	0,50	4,02	1,1	5,3

TABLEAU E.18. Conductivité thermique et capacité calorifique de différents matériaux et types de sol, accompagnés de la dimension caractéristique $z_0 = \sqrt{\frac{2\kappa}{C_V\omega}}$ et du flux maximal $A\sqrt{C_V\kappa\omega}$ associés à des variations de température annuelle d’amplitude $A = 8,3^\circ\text{C}$ qui correspondent à ces matériaux et types de sol. Les sols sableux et argileux ont une porosité de 0,4 ; le sol tourbeux une porosité de 0,8.

Voilà qui est désagréablement proche du niveau de puissance qu'on aimerait pouvoir fournir en hiver ; pour une maison ancienne comme la mienne, il est vraisemblable que la demande hivernale maximale en air chaud et en eau chaude soit de 40 kWh/j par personne.

Ce calcul suggère que dans une banlieue typique, *tout le monde ne peut pas utiliser des pompes à chaleur géothermiques*, à moins de faire attention à renvoyer la chaleur dans le sol de façon active pendant l'été.

Faisons un second calcul pour déterminer la quantité de puissance que l'on pourrait aspirer en continu d'une boucle dans le sol à une profondeur de $h = 2$ m. Supposons qu'on se permette d'aspirer la température au niveau de la boucle jusqu'à atteindre $\Delta T = 5^\circ\text{C}$ en dessous de la température moyenne du sol à la surface, et supposons qu'en surface, la température soit constante. On peut alors en déduire le flux de chaleur depuis la surface. En prenant une conductivité de 1,2 W/m/K (typique d'un sol argileux humide) :

$$\text{Flux} = \kappa \times \frac{\Delta T}{h} = 3 \text{ W/m}^2.$$

Si, comme précédemment, on fait l'hypothèse d'une densité de population de 160 m² par habitant, alors la puissance maximale par personne que peuvent fournir des pompes à chaleur géothermiques, si tout le monde en a dans le quartier, est de 480 W, ce qui fait 12 kWh/j par personne.

On arrive donc encore une fois à la conclusion que dans une banlieue typique composée de maisons mal isolées comme la mienne, *tout le monde ne peut pas utiliser des pompes à chaleur géothermiques*, à moins de bien veiller à recharger le sol en chaleur pendant l'été. Et dans les villes avec des densités de population plus élevées, les pompes à chaleur géothermiques ne sont probablement pas une solution viable.

Par conséquent, je suggère les pompes à chaleur air-air comme meilleur choix de chauffage pour le plus grand nombre.

L'inertie thermique

Peut-on réduire sa facture de chauffage et de rafraîchissement en augmentant l'inertie thermique d'un bâtiment ? Cela dépend. La température extérieure peut varier d'environ 10 °C sur une journée. Un bâtiment avec une inertie thermique élevée — avec d'épais murs de pierre de taille, par exemple — atténuera naturellement ces variations de température, et, sans chauffage ni refroidissement, aura une température proche de la température moyenne à l'extérieur. Ces bâtiments, au Royaume-Uni, n'ont besoin ni de chauffage ni de climatisation de nombreux mois de l'année. Au contraire, un bâtiment mal isolé et avec une faible inertie thermique pourra sembler trop chaud le jour et trop froid la nuit, conduisant à une plus forte dépense de climatisation et de chauffage.

Cependant, une inertie thermique élevée n'est pas toujours la panacée. Si une pièce n'est occupée en hiver que quelques heures par jour (prenez

Supposons que le sol soit constitué d'un matériau solide et homogène, de conductivité κ et de capacité calorifique C_V . La température à la profondeur z et au temps t répond alors à la température imposée à la surface selon l'équation de diffusion :

$$\frac{\partial T(z, t)}{\partial t} = \frac{\kappa}{C_V} \frac{\partial^2 T(z, t)}{\partial z^2}. \quad (\text{E.4})$$

Pour une température imposée de forme sinusoïdale, de fréquence ω et d'amplitude A à la profondeur $z = 0$,

$$T(0, t) = T_{\text{surface}}(t) = T_{\text{moyenne}} + A \cos(\omega t), \quad (\text{E.5})$$

la température résultante à la profondeur z et au temps t est une fonction décroissante et oscillante

$$T(z, t) = T_{\text{moyenne}} + A e^{-z/z_0} \cos(\omega t - z/z_0), \quad (\text{E.6})$$

où z_0 est la dimension caractéristique à la fois de la décroissance et de l'oscillation,

$$z_0 = \sqrt{\frac{2\kappa}{C_V \omega}}. \quad (\text{E.7})$$

Le flux de chaleur (puissance par unité de surface) à la profondeur z est égal à :

$$\kappa \frac{\partial T}{\partial z} = \kappa \frac{A}{z_0} \sqrt{2} e^{-z/z_0} \sin(\omega t - z/z_0 - \pi/4). \quad (\text{E.8})$$

Par exemple, à la surface, le flux maximal est égal à :

$$\kappa \frac{A}{z_0} \sqrt{2} = A \sqrt{C_V \kappa \omega}. \quad (\text{E.9})$$

CADRE E.19. Calcul du flux naturel provoqué par des variations de température sinusoïdales.

une salle de lecture, par exemple), le coût énergétique pour réchauffer cette pièce à une température confortable sera d'autant plus grand que l'inertie thermique de la pièce est grande. Cette chaleur dépensée en plus restera plus longtemps dans une pièce thermiquement massive, mais si personne n'est là pour en profiter, cette chaleur est gaspillée. Donc, dans le cas de pièces peu utilisées, il est plus logique de concevoir une structure à faible inertie thermique, que l'on chauffera rapidement au moment où on en aura besoin.

Notes et bibliographie

Page n°

- 352 *Figure E.12.* Les normes de Maison Passive utilisent une convention différente de celle de ce livre pour définir la puissance, en la mesurant en termes de « consommation d'énergie primaire ». Cela impose donc de connaître la manière dont sont obtenus l'électricité et les combustibles consommés, ainsi

que les facteurs de conversion énergétique utilisés. Cela signifie aussi que les normes de Maison Passive sont en réalité plus sévères que ce que ne suggère cette figure (quant à savoir à quel point ces normes sont plus sévères, cela dépend du mix énergétique utilisé). Soit dit en passant, si la Maison Passive consomme $6,6 \text{ W/m}^2$ pour la puissance calorifique et $12,2 \text{ W/m}^2$ en tout, l'analyse de la consommation de ma propre maison « après », montre une consommation de $6,2 \text{ W/m}^2$ de gaz et de $7,1 \text{ W/m}^2$ en tout.

357 *Tableau E.18.* Sources : Bonan (2002),
www.hukseflux.com/thermalScience/thermalConductivity.html

F Vagues II

La physique de la houle en eaux profondes

La houle possède de l'énergie sous deux formes : de l'énergie potentielle et de l'énergie cinétique. L'énergie potentielle est celle qui permet à l'eau des creux de monter jusqu'aux crêtes. L'énergie cinétique est associée au déplacement circulaire de l'eau.

Les gens croient souvent que si la crête des vagues se déplace à 50 km/h, alors l'eau de la crête se déplace elle aussi à cette vitesse. En fait, ce n'est pas du tout le cas. C'est exactement comme la « ola » dans les stades : quand la « ola » fait le tour du stade, les personnes qui y participent ne font pas eux-mêmes le tour du stade ; ils ne font que se lever et s'asseoir l'espace d'un instant, en restant à leur place. Le déplacement de l'eau dans l'océan est de même nature : si vous observez une algue qui flotte sur l'eau alors que des vagues passent, vous verrez que l'algue ne fait que monter et descendre avec un léger mouvement de va-et-vient dans la direction de propagation de la vague — pour reproduire exactement ce mouvement lors d'une « ola », il faudrait que les personnes qui y participent fassent le mouvement du laveur de vitre qui nettoie une fenêtre d'un mouvement circulaire. La vague possède de l'énergie potentielle, car les crêtes sont plus élevées que les creux ; et elle possède de l'énergie cinétique à cause du petit mouvement circulaire de va-et-vient de l'eau.

Nos calculs approximatifs de la puissance de la houle nécessite de prendre en compte trois paramètres : une estimation de la période T des vagues (le temps entre deux crêtes) ; une estimation de la hauteur h des vagues ; et une formule de physique qui nous indique comment déterminer la vitesse v de la vague en fonction de la période.

La longueur d'onde λ et la période des vagues de houle (respectivement, la distance et le temps entre deux crêtes) dépendent de la vitesse du vent qui crée les vagues, comme le montre la figure F.1. La hauteur des vagues ne dépend pas de la vitesse du vent, mais plutôt de la durée pendant laquelle le vent a caressé la surface de la mer.

Vous pouvez estimer la période des vagues de houle en vous rappelant le temps qui sépare l'arrivée de deux vagues sur une plage qui donne sur l'océan. De l'ordre de 10 secondes ? Pour la hauteur, faisons l'hypothèse d'une amplitude de 1 mètre, ce qui fait 2 mètres du creux à la crête. Avec une houle d'une telle amplitude, un homme dans un canot ne peut pas voir au-delà des vagues qui l'entourent lorsqu'il est dans un creux ; c'est probablement une hauteur supérieure à la moyenne, mais on pourra revenir sur cette estimation si nécessaire. La vitesse de ces vagues en pleine mer est reliée à la période T par la formule suivante (voir Faber (1995), page 170) :

$$v = \frac{gT}{2\pi},$$

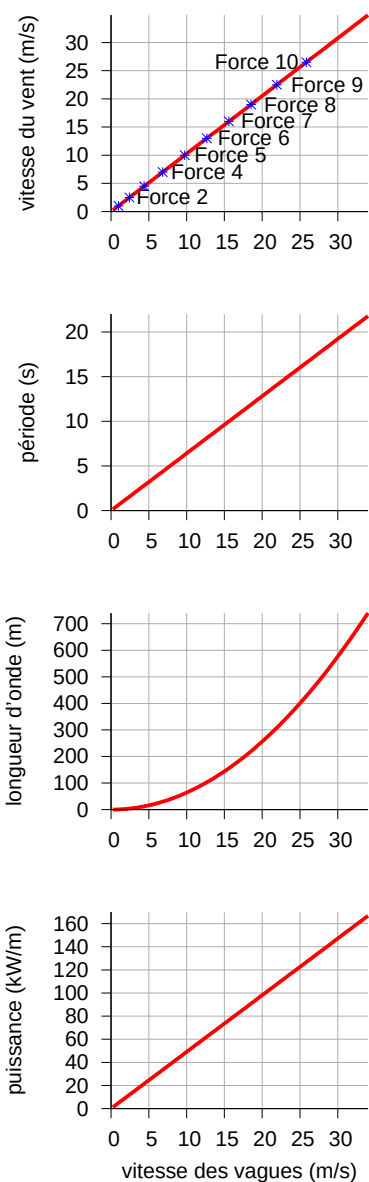


FIGURE F.1. Quelques chiffres sur la houle en eaux profondes. Dans les quatre figures, l'axe horizontal représente la vitesse des vagues en m/s. Du haut en bas, les graphes représentent : la vitesse du vent (en m/s) nécessaire pour créer une houle se déplaçant à la vitesse indiquée ; la période (en secondes) des vagues de houle ; la longueur d'onde (en mètres) des vagues de houle ; et la densité de puissance (en kW/m) d'une vague de houle de 1 m d'amplitude.

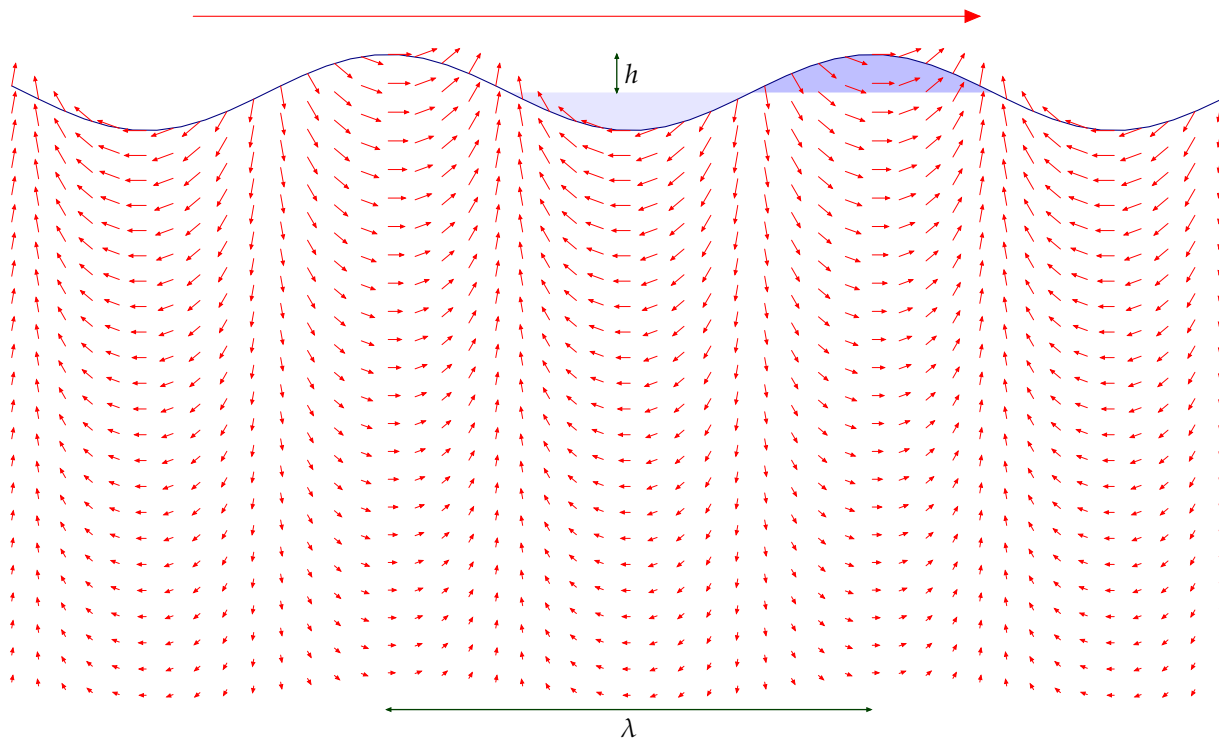


FIGURE F.2. Une vague possède de l'énergie sous deux formes : de l'énergie potentielle associée à l'eau qui monte du creux en gris clair vers la crête en gris foncé ; et de l'énergie cinétique de toute l'eau de surface qui recouvre quelques longueurs d'onde — la vitesse de l'eau est schématisée par les petites flèches. La vitesse des vagues se déplaçant de gauche à droite est représentée par la grosse flèche tout en haut.

où g est l'accélération de la pesanteur ($9,8 \text{ m/s}^2$). Par exemple, si $T = 10$ secondes, alors $v = 16 \text{ m/s}$. La longueur d'onde d'une telle vague de houle — la distance entre les crêtes — est alors de $\lambda = vT = gT^2/2\pi = 160 \text{ m}$.

Pour une houle de longueur d'onde λ et de période T , si la hauteur de chaque crête et la profondeur de chaque creux est de $h = 1 \text{ m}$, l'énergie potentielle qui passe ainsi par unité de temps et par unité de longueur est égale à :

$$P_{\text{potentielle}} \simeq m^* g \bar{h} / T, \quad (\text{F.1})$$

où m^* est la masse par unité de longueur, qui vaut à peu près $\frac{1}{2}\rho h(\lambda/2)$ (en approximant la surface de la crête grisée de la figure F.2 par la surface d'un triangle), et où $\bar{h}$ est le changement d'altitude du centre de gravité de la masse d'eau qui monte et descend — il est à peu près égale à h . On a donc :

$$P_{\text{potentielle}} \simeq \frac{1}{2}\rho h \frac{\lambda}{2} g h / T. \quad (\text{F.2})$$

(Le calcul aurait plus rigoureux si on avait utilisé des intégrales, mais ici, il aurait donné le même résultat.) Comme λ/T correspond à la vitesse à laquelle les vagues se déplacent, c'est-à-dire v , on a :

$$P_{\text{potentielle}} \simeq \frac{1}{4}\rho g h^2 v. \quad (\text{F.3})$$

Les vagues ont une énergie cinétique en plus de leur énergie potentielle, et, de manière tout à fait remarquable, toutes deux sont parfaitement égales, même si je ne détaille pas le calcul ici. La puissance totale des vagues est donc le double de la puissance que nous avons calculée pour leur énergie potentielle :

$$P_{\text{totale}} \simeq \frac{1}{2} \rho g h^2 v. \quad (\text{F.4})$$

Cette solution ne pose qu'un seul problème : sa valeur est trop forte, parce que nous avons négligé une propriété étrange des ondes dispersives : l'énergie de l'onde à la surface de l'eau ne se déplace pas à la même vitesse que la crête des ondes ; elle se déplace à une vitesse que l'on appelle la vitesse de groupe qui, pour la houle en eaux profondes est égale à la *moitié* de la vitesse v des crêtes. On peut se rendre compte de ce phénomène en jetant un galet dans une mare et en regardant les ondes avec attention. Cela signifie que l'équation F.4 est fautive : il faut diviser son terme de droite par deux. L'expression correcte de la puissance par unité de longueur de front d'onde est donc :

$$P_{\text{totale}} = \frac{1}{4} \rho g h^2 v. \quad (\text{F.5})$$

Avec comme valeurs $v = 16$ m/s et $h = 1$ m, on obtient :

$$P_{\text{totale}} = \frac{1}{4} \rho g h^2 v = 40 \text{ kW/m}. \quad (\text{F.6})$$

Cette estimation grossière colle assez bien avec les valeurs mesurées dans l'Atlantique (Mollison, 1986) (voir page 88.)

Les pertes dues à la viscosité du milieu aqueux sont faibles : des vagues de houle avec une période de 9 secondes doivent faire trois fois le tour de la Terre pour perdre 10 % de leur amplitude.

Des systèmes houlomoteurs concrets

Les installations en eau profonde

Quel est le rendement des systèmes houlomoteurs ? Les « batteurs » de Stephen Salter ont été bien étudiés : une rangée de canards de 16 m de diamètre se nourrissant de l'énergie de la houle atlantique avec une puissance moyenne de 45 kW/m pourrait permettre, en comptant les pertes en ligne, de fournir 19 kW/m au centre de l'Écosse (Mollison, 1986).

Le projet Pelamis porté par *Ocean Power Delivery* a supplanté le projet de Stephen Salter comme caisson flottant houlomoteur en eau profonde : quatre caissons flottants de 3,5 m de diamètre, reliés entre eux par des charnières articulées formant un véritable serpent de mer de 130 m de long. La puissance maximale obtenue par chaque serpent est de 750 kW. Ces systèmes Pelamis sont conçus pour être installés au mouillage dans des eaux d'environ 50 m de profondeur. Dans une usine houlomotrice,

39 serpents installés sur trois rangées feraient face à la direction de houle dominante, occupant une surface de l'océan de 2,5 km de front par 400 m de longueur (soit une surface de 1 km²). La largeur efficace d'un de ces systèmes Pelamis est de 7 m (dans les conditions optimales, un tel système extrait 100 % de l'énergie sur 7 m de large). Les promoteurs affirment qu'une telle ferme houlomotrice pourrait fournir 10 kW/m.

Les installations en eaux peu profondes

A peu près 70 % de l'énergie de la houle est perdue par frottement sur le fond quand la profondeur décroît de 100 m à 15 m. En eau peu profonde, la puissance des vagues par unité de longueur de littoral est donc réduite à environ 12 kW/m. L'Oyster, développé par la Queen's University de Belfast et la société *Aquamarine Power Ltd* [www.aquamarinepower.com], est composé d'un aileron vertical de 12 m de haut, et il est supposé être fixé sur un support plat posé par 12 m de fond dans des zones où la puissance moyenne incidente des vagues de houle est supérieure à 15 kW/m. La puissance crête est de 600 kW. Un seul Oyster produirait environ 270 kW avec des creux de vagues de houle supérieurs à 3,5 m. Selon les prévisions effectuées, un Oyster devrait produire une puissance par unité de masse installée supérieure à un Pelamis.

Les systèmes Oyster, qui actionnent en fait une pompe à double piston, pourraient aussi être utilisés pour dessaler directement de l'eau de mer par osmose inverse. « La production maximale d'eau douce d'un système de dessalement Oyster est comprise entre 2 000 et 6 000 m³/jour ». Si l'on en juge par l'installation de l'île de Jersey (qui consomme 8 kWh par m³), cela équivaut à entre 600 et 2 000 kW d'électricité.

G Marées II

Densité de puissance de lagunes marémotrices

Pour estimer la puissance d'un bassin marémoteur artificiel, imaginons qu'il se remplisse rapidement à marée haute et qu'il se vide rapidement à marée basse. Ses turbines génèrent de la puissance dans les deux sens, à marée montante et descendante. (C'est ce qu'on appelle la génération bidirectionnelle ou à double effet). La variation de l'énergie potentielle de l'eau, toutes les six heures, est égale à mgh , où h est la variation de hauteur du centre de gravité de l'eau, ou amplitude. (L'amplitude est égale à la moitié du marnage, qui est la différence de hauteur entre la marée haute et la marée basse ; figure G.1.) La masse par unité de surface couverte par le bassin marémoteur est égale à $\rho \times (2h)$, où ρ est la densité de l'eau ($1\,000\text{ kg/m}^3$). La puissance par unité de surface générée par un bassin marémoteur est donc égale à :

$$\frac{2\rho gh}{6\text{ heures}},$$

en supposant que les générateurs aient un rendement parfait (100 %). Si on intègre une amplitude $h = 2$ mètres (soit un marnage de 4 mètres), on trouve une puissance par unité de surface de bassin marémoteur de $3,6\text{ W/m}^2$. En se donnant un rendement de conversion de cette puissance en électricité de 90 %, on obtient

puissance par unité de surface de bassin marémoteur $\simeq 3\text{ W/m}^2$.

Donc, pour générer 1 GW de puissance (en moyenne), il nous faut un bassin marémoteur couvrant une superficie d'environ 300 km^2 . Un bassin circulaire d'un diamètre de 20 km ferait l'affaire. (A titre de comparaison, la superficie de l'estuaire de la Severn en amont du barrage actuellement envisagé est d'environ 550 km^2 , et celle du Wash est supérieure à 400 km^2).

Si un bassin marémoteur ne produit de l'électricité que dans une seule direction, la puissance par unité de surface est réduite de moitié. La densité de puissance moyenne du barrage marémoteur de La Rance, où le marnage est en moyenne de 10,9 mètres, a produit $2,7\text{ W/m}^2$ durant des décennies (page 102).

La ressource marémotrice brute

Les marées autour de la Grande-Bretagne sont d'authentiques vagues de marée. (Les tsunamis, que l'on appelle aussi « raz-de-marée », n'ont rien à voir avec les marées : ils sont provoqués par des glissements de terrain et des tremblements de terre sous-marins). L'onde de marée (ou

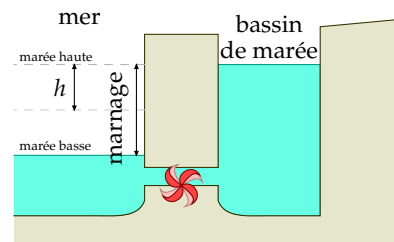
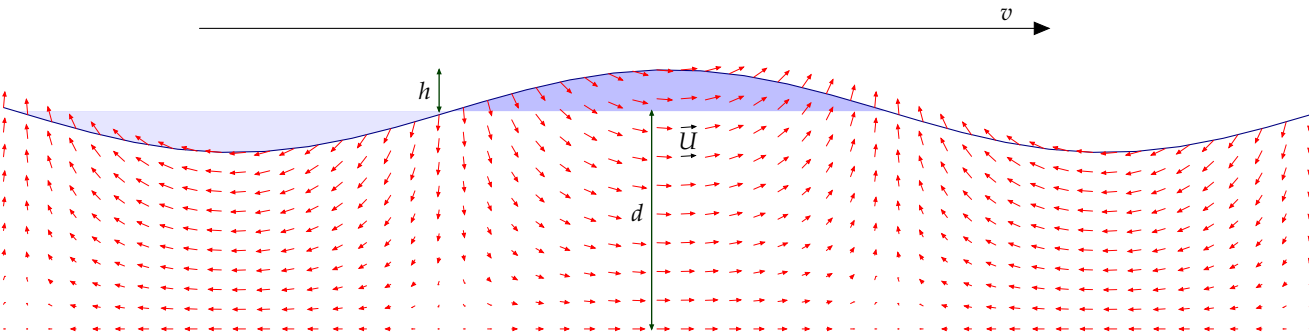


FIGURE G.1. Un bassin marémoteur en coupe. On a rempli le bassin à marée haute, et le schéma montre le bassin à marée basse : on laisse l'eau sortir du bassin en passant à travers un générateur électrique, qui transforme l'énergie potentielle de l'eau en électricité.



plus exactement sa crête) se déplace beaucoup plus vite que le flux de marée proprement dit — de l'ordre de 160 kilomètres par heure, alors que l'eau elle-même se déplace à seulement 1 ou 2 kilomètres par heure.

La quantité d'énergie que l'on peut extraire des marées en utilisant des bassins marémoteurs ou des fermes marémotrices ne pourra jamais être supérieure à la quantité d'énergie que possèdent ces ondes de marée. On peut estimer la puissance totale des grandes ondes de marée de l'océan Atlantique de la même manière que l'on pourrait estimer la puissance de vagues ordinaires générées par le vent. La section qui suit décrit un modèle standard de la puissance qui arrive sous la forme d'ondes qui se propagent dans une eau de profondeur d , lorsque d est faible comparée à la longueur d'onde (figure G.2). La puissance par unité de longueur de crête des ondes de marée en eau peu profonde est de :

$$\rho g^{3/2} \sqrt{d} h^2 / 2. \tag{G.1}$$

Le tableau G.3 montre la puissance par unité de longueur de crête d'onde pour quelques valeurs plausibles. Si $d = 100$ m, et $h = 1$ mètre (respectivement, $h = 2$ mètres), la puissance par unité de longueur de crête d'onde est de 150 kW/m (respectivement, de 600 kW/m). Ces chiffres sont impressionnants si on les compare à la puissance brute par unité de longueur des vagues atlantiques ordinaires en eaux profondes, qui est de 40 kW/m (chapitre F). Les vagues et les marées atlantiques ont des amplitudes verticales similaires (environ 1 mètre), mais la puissance brute des marées est environ 10 fois plus grande que celle des vagues ordinaires créées par les vents.

Taylor (1920) a construit un modèle plus détaillé de la puissance des marées, qui prend en compte des détails importants comme la force de Coriolis (l'effet produit par la rotation quotidienne de la Terre), l'existence d'ondes de marées qui se déplacent dans la direction opposée, et l'effet direct de la Lune sur le flux d'énergie dans la mer d'Irlande. Depuis, des mesures expérimentales et des simulations par ordinateur ont vérifié et prolongé l'analyse de Taylor. Flather (1976) a construit un modèle numérique détaillé de la marée lunaire, découpant le plateau continental autour des îles Britanniques en environ 1 000 cellules carrées. Flather a estimé que

FIGURE G.2. Une vague en eau peu profonde. Tout comme une vague en eaux profondes, cette onde possède de l'énergie sous deux formes : l'énergie potentielle associée au déplacement de l'eau vers le haut, depuis les creux en ton clair jusqu'aux crêtes en ton foncé ; et l'énergie cinétique de toute l'eau qui se déplace comme indiqué par les petites flèches rouges. La vitesse de l'onde, qui se déplace de la gauche vers la droite, est indiquée par la grande flèche en haut du schéma. Pour les ondes de marée, une profondeur typique pourrait être de 100 mètres, la vitesse des crêtes de 30 m/s, l'amplitude verticale à la surface de 1 ou 2 mètres, et l'ordre de grandeur de la vitesse de l'eau de 0,3 ou 0,6 m/s.

h (m)	$\rho g^{3/2} \sqrt{d} h^2 / 2$ (kW/m)
0,9	125
1,0	155
1,2	220
1,5	345
1,75	470
2,0	600
2,25	780

TABEAU G.3. Flux de puissance (puissance par unité de longueur de crête d'onde) pour une profondeur $d = 100$ m.

la puissance moyenne totale qui arrive dans cette zone était de 215 GW. D'après son modèle, 180 GW entrent dans l'espace qui séparent la France et l'Irlande. De l'Irlande du nord jusqu'aux îles Shetland, la puissance entrante est de 49 GW. Entre les îles Shetland et la Norvège, il y a une perte nette de 5 GW. Comme le montre la figure G.4, Cartwright et al. (1980) ont trouvé de manière expérimentale que la transmission de puissance moyenne était de 60 GW entre Malin Head en Irlande, et Florø en Norvège, et de 190 GW entre Valentia en Irlande et la côte bretonne au large d'Ouessant. La puissance qui entre en mer d'Irlande a été trouvée égale à 45 GW, et celle qui entre en mer du Nord via le Pas de Calais, à 16,7 GW.

La puissance des ondes de marée

Cette section, sur laquelle vous pouvez sans problème faire l'impasse, donne plus de détails sur l'origine de la formule de la puissance des marées utilisée dans la section précédente. Je vais creuser un peu la question parce que les estimations officielles de la ressource marémotrice au Royaume-Uni reposent sur un modèle qui, me semble-t-il, est incorrect.

La figure G.2 montre un modèle d'onde de marée qui se déplace dans une eau relativement peu profonde. Ce modèle permet de schématiser, par exemple, les crêtes d'onde de marée qui remontent la Manche, ou descendent la mer du Nord. Il est important de distinguer la vitesse U à laquelle l'eau elle-même se déplace (qui peut être d'environ 1 ou 2 kilomètres à l'heure) de la vitesse v à laquelle la marée haute se déplace, et qui est typiquement de 200 kilomètres à l'heure.

L'eau a une profondeur d . Les crêtes et les creux d'eau entrent par la gauche du fait des marées océaniques toutes les 12 heures. Ces crêtes et ces creux se déplacent à la vitesse :

$$v = \sqrt{gd}. \quad (\text{G.2})$$

On suppose que la profondeur est très petite par rapport à la longueur d'onde, et on va négliger des détails comme la force de Coriolis et les variations de densité de l'eau de mer. Appelons h l'amplitude verticale de la marée. Du fait de l'hypothèse standard d'un flux quasiment sans tourbillon, la vitesse horizontale de l'eau U est presque constante en fonction de la profondeur. Cette vitesse horizontale est proportionnelle au déplacement en surface, et peut être déterminée par la loi de conservation de la masse :

$$U = vh/d. \quad (\text{G.3})$$

La vitesse de l'onde v diminue avec la profondeur (équation G.2). Pour le moment, on va supposer que la profondeur est constante. L'énergie circule de gauche à droite avec un certain débit. Comment pourrait-on évaluer cette puissance totale de marée ? Et quelle est la puissance *maximum* qui pourrait en être extraite ?

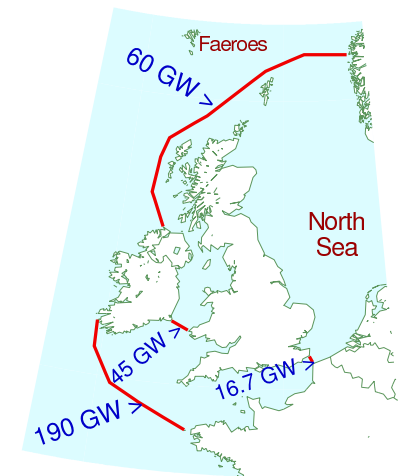


FIGURE G.4. Puissances moyennes de marée mesurées par Cartwright et al. (1980).

Une méthode possible consiste à choisir une coupe transversale et à estimer le *flux d'énergie cinétique moyen* qui traverse cette section plane, puis considérer que cette quantité représente la puissance que l'on pourrait extraire. Cette méthode qui repose sur le flux d'énergie cinétique est celle utilisées par les consultants Black et Veatch pour estimer la ressource marémotrice au Royaume-Uni. Dans notre schéma, on peut calculer la puissance totale d'une autre manière. On va voir que la réponse basée sur le flux d'énergie cinétique sous-estime la ressource d'un facteur multiplicatif significatif.

Le pic du flux d'énergie cinétique dans toute section transversale est égal à :

$$K_{BV} = \frac{1}{2} \rho A U^3, \quad (G.4)$$

où A est la surface de la section. (Il s'agit de la formule du flux d'énergie cinétique que nous avons rencontrée dans le chapitre B.)

La vraie puissance incidente totale n'est pas égale à ce flux d'énergie cinétique. Le calcul de la vraie puissance incidente totale d'une onde se propageant dans des eaux peu profondes est un classique des livres de cours ; l'une des manières de la déterminer est de calculer la quantité d'énergie totale dans une longueur d'onde et de la diviser par la période. La quantité d'énergie totale par longueur d'onde est la somme de l'énergie potentielle et de l'énergie cinétique. Et il se trouve que l'énergie cinétique est égale à l'énergie potentielle. (Il s'agit d'une caractéristique standard d'à peu près tout ce qui oscille, qu'il s'agisse de masses au bout de ressorts ou d'enfants sur des balançoires). Pour calculer la quantité d'énergie totale, tout ce dont nous avons besoin est donc de calculer l'une des deux quantités d'énergie — soit l'énergie potentielle par longueur d'onde, soit l'énergie cinétique par longueur d'onde — puis de la multiplier par deux. L'énergie potentielle d'une onde (par longueur d'onde et par unité de largeur de front d'onde), se calcule par une intégrale, et vaut :

$$\frac{1}{4} \rho g h^2 \lambda. \quad (G.5)$$

Si on multiplie ce résultat par deux et qu'on le divise par la période, on obtient la véritable puissance de ce modèle d'une onde de marée en eaux peu profondes qui est égale à :

$$\text{puissance} = \frac{1}{2} (\rho g h^2 \lambda) \times w / T = \frac{1}{2} \rho g h^2 v \times w, \quad (G.6)$$

où w est la largeur du front d'onde. Et en substituant $v = \sqrt{gd}$, on obtient :

$$\text{puissance} = \rho g h^2 \sqrt{gd} \times w / 2 = \rho g^{3/2} \sqrt{d} h^2 \times w / 2. \quad (G.7)$$

Si, maintenant, on compare cette puissance avec le flux d'énergie cinétique K_{BV} , on remarque quelque chose de frappant : ces deux expressions

dépendent d'une puissance différente de l'amplitude h . Si on utilise la relation de conversion de l'amplitude (G.3), de la vitesse de la crête d'onde (G.2), et l'égalité $A = wd$, on peut alors ré-exprimer le flux d'énergie cinétique comme suit :

$$K_{BV} = \frac{1}{2}\rho AU^3 = \frac{1}{2}\rho wd(vh/d)^3 = \rho \left(g^{3/2}/\sqrt{d}\right) h^3 \times w/2. \quad (G.8)$$

La méthode du flux d'énergie cinétique suggère donc que la puissance totale d'une onde qui se propage en eaux peu profondes évolue comme le *cube* de l'amplitude (équation G.8) ; mais la formule correcte montre que la puissance évolue comme le *carré* de l'amplitude (équation G.7).

Le ratio flux d'énergie cinétique sur puissance est égal à :

$$\frac{K_{BV}}{\text{puissance}} = \frac{\rho w \left(g^{3/2}/\sqrt{d}\right) h^3}{\rho g^{3/2} h^2 \sqrt{d} w} = \frac{h}{d}. \quad (G.9)$$

Comme h est généralement beaucoup plus petit que d (h est d'environ 1 ou 2 mètres, alors que d est généralement de l'ordre de 100 ou 10 mètres), les estimations de la ressource de puissance de marée qui reposent sur la méthode du flux d'énergie cinétique peuvent être *beaucoup trop basses*, du moins dans les cas où ce schéma d'ondes de marée en eaux peu profondes est applicable.

De plus, les estimations qui reposent sur la méthode du flux d'énergie cinétique supposent à tort que la puissance totale disponible lors des marées de vives-eaux est huit fois plus importante que celle disponible lors des marées de mortes-eaux, en supposant un rapport deux entre l'amplitude des marées de vives-eaux et celles de mortes-eaux. Mais la réponse correcte est que la puissance totale disponible d'une onde en déplacement évolue comme le carré de l'amplitude de cette onde, et non comme son cube. Le rapport de la puissance totale disponible entre les marées de vives-eaux et de mortes-eaux est donc de quatre.

Effets d'un fond marin incliné et de la force de Coriolis

Si la profondeur d diminue peu à peu et que la largeur reste constante de telle sorte que le rebond et l'absorption de la puissance entrante soient minimaux, alors la puissance de l'onde restera constante. Cela signifie que $\sqrt{d}h^2$ est une constante, ce dont on peut déduire que l'amplitude de la marée varie avec la profondeur en $h \sim 1/d^{1/4}$.

Il s'agit un modèle assez grossier. L'un des détails que nous avons négligés, c'est la force de Coriolis. Cette force a pour effet de pousser les crêtes et les creux de marée vers l'est — par exemple, en remontant la Manche, les marées hautes sont plus hautes et les marées basses plus basses sur la côte française que sur la côte britannique. En négligeant cet effet, j'ai pu introduire une petite erreur dans les estimations.

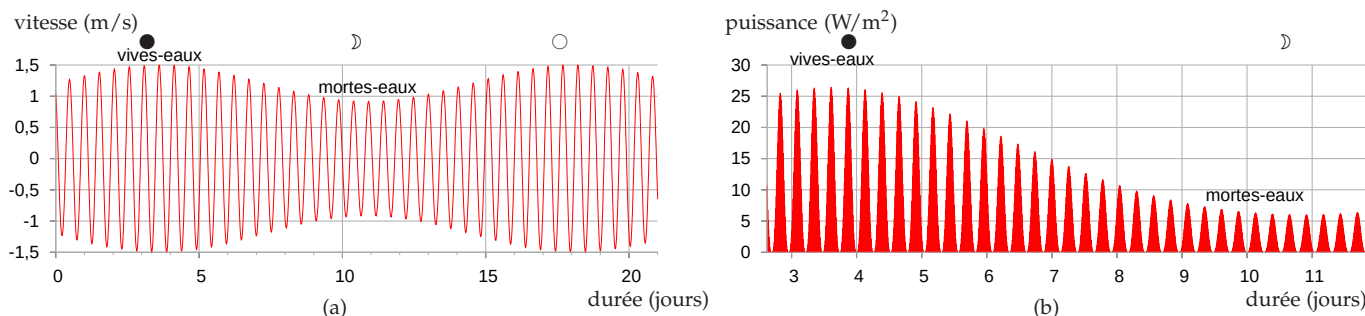


FIGURE G.5. (a) Courant de marée sur une période de 21 jours sur un site où le courant maximum lors des marées de vives-eaux est de 2,9 nœuds (1,5 m/s) et le courant maximum lors des marées de mortes-eaux est de 1,8 nœud (0,9 m/s).

(b) La puissance par unité de surface de fond marin sur une période de neuf jours allant des vives-eaux aux mortes-eaux. La puissance culmine quatre fois par jour, et sa valeur maximum est d'environ 27 W/m². La puissance moyenne de la ferme marémotrice est de 6,4 W/m².

Densité de puissance de fermes marémotrices

Imaginons que l'on installe des turbines sous-marines fixées au fond marin (des hydroliennes). Le flux d'eau va faire tourner ces turbines. La densité de l'eau étant en gros 1 000 fois celle de l'air, la puissance du flux d'eau est 1 000 fois plus importante que la puissance d'un vent de même vitesse.

Quelle puissance des fermes exploitant le courant de marée pourraient-elles extraire? Un point crucial est de savoir si l'on peut faire la somme des puissances individuelles des turbines lorsqu'elles sont situées les unes à côté des autres au fond de l'eau. Dans le cas du vent, cette hypothèse d'additivité est considérée comme réaliste : du moment que les turbines éoliennes sont écartées les unes des autres d'une distance standard, la puissance totale fournie par 10 fermes éoliennes adjacentes est la somme des puissances que chacune fournirait si elle était isolée.

En va-t-il de même pour les fermes marémotrices? Ou bien les hydroliennes interfèrent-elles différemment entre elles? Je ne crois pas que l'on ait de réponse définitive à cette question, du moins dans le cas général. On peut cependant donner deux hypothèses mutuellement exclusives et identifier des situations schématiques dans lesquelles l'une ou l'autre semble valide. Selon la première hypothèse « la marée fonctionne comme le vent », on peut installer des hydroliennes partout sur le fond de la mer, à condition de les espacer d'environ 5 diamètres les unes des autres, et elles ne se gêneront pas les unes les autres, quelle que soit la surface de fond marin recouverte d'hydroliennes. Par contre, selon la seconde hypothèse « on ne peut installer qu'une seule ligne d'hydroliennes », la puissance maximum extractible dans une zone donnée est la puissance qui serait fournie par une *seule* ligne de turbines faisant face au flux. Une situation où cette seconde hypothèse se vérifie, c'est le cas particulier d'un barrage hydroélectrique : si l'eau d'un barrage passe à travers une seule turbine bien conçue, ça ne sert à rien d'installer d'autres turbines derrière elle. On ne peut pas obtenir 100 fois plus de puissance en installant 99 turbines supplémentaires en aval de la première; tout le jus est extrait par la première, et il n'y en a plus pour les suivantes. L'hypothèse « on ne peut instal-

ler qu’une seule ligne d’hydroliennes » est donc la bonne lorsqu’il s’agit d’estimer la puissance extractible quand l’eau s’écoule à travers un étroit chenal depuis un bassin d’eau stationnaire à une hauteur donnée vers une autre étendue d’eau de plus faible hauteur. (Ce cas est celui analysé par Garrett et Cummins (2005, 2007).)

Je vais maintenant donner mon avis personnel. Je pense que dans de nombreux endroits autour des îles britanniques, l’hypothèse « la marée fonctionne comme le vent » est une bonne approximation. Il y a peut-être quelques sites dont les caractéristiques correspondent à celles d’un chenal étroit, et il est possible que pour ces sites, mes estimations soient surévaluées.

Supposons que les règles qui s’appliquent pour agencer une ferme marémotrice raisonnable soient semblables à celles qui s’appliquent aux fermes éoliennes, et que le rendement des hydroliennes soit proche de celui des meilleures éoliennes, soit environ 1/2. On peut alors emprunter la formule de la puissance d’une ferme éolienne (par unité de surfaces de terres) de la page 313. La puissance par unité de surface de fond de mer est donc :

$$\frac{\text{puissance par hydrolienne}}{\text{superficie par hydrolienne}} = \frac{\pi}{200} \frac{1}{2} \rho U^3. \quad (\text{G.10})$$

En utilisant cette formule, le tableau G.6 montre la puissance de cette ferme marémotrice selon quelques courants de marée.

Ceci étant dit, quelle sont les courants de marée typiques ? Les annuaires de marée donnent généralement les courants associés aux marées de plus grand marnage (les marées de vives-eaux) et de plus faible marnage (les marées de mortes-eaux). Ces premières ont lieu après chaque pleine lune et chaque nouvelle lune, et ces dernières après chaque premier et dernier quartier. La puissance d’une ferme marémotrice varierait en permanence, mais de manière totalement prévisible. La figure G.5 illustre la manière dont varie la densité de puissance d’une ferme marémotrice sur un site où le courant maximum est de 1,5 m/s. La densité de puissance moyenne de cette ferme marémotrice serait de 6,4 W/m². Il y a de nombreux endroits autour des îles britanniques où la puissance par unité de surface de ferme marémotrice serait d’au moins 6 W/m². Cette densité de puissance est du même ordre de grandeur que nos estimations des densités de puissance des fermes éoliennes (2 à 3 W/m²) et des fermes photovoltaïques (5 à 10 W/m²).

Nous allons maintenant utiliser cette théorie « la marée fonctionne comme le vent » pour estimer la puissance extractible des flux de marée dans les zones prometteuses autour des îles britanniques. Par mesure de précaution, nous allons aussi déterminer la puissance totale de marée qui traverse chacune de ces régions en utilisant la théorie de la « puissance des ondes de marée », et nous assurer que notre estimation de la puissance

U (m/s)	U (nœuds)	puissance de ferme marémotrice (W/m ²)
0,5	1	1
1	2	8
2	4	60
3	6	200
4	8	500
5	10	1 000

TABLEAU G.6. Densité de puissance d’une ferme marémotrice (en watts par mètre carré de fond de mer) comme une fonction de la vitesse du flux U . (1 nœud = 1 mille nautique par heure = 0,514 m/s.) La densité de puissance se calcule par $\frac{\pi}{200} \frac{1}{2} \rho U^3$ (équation G.10).

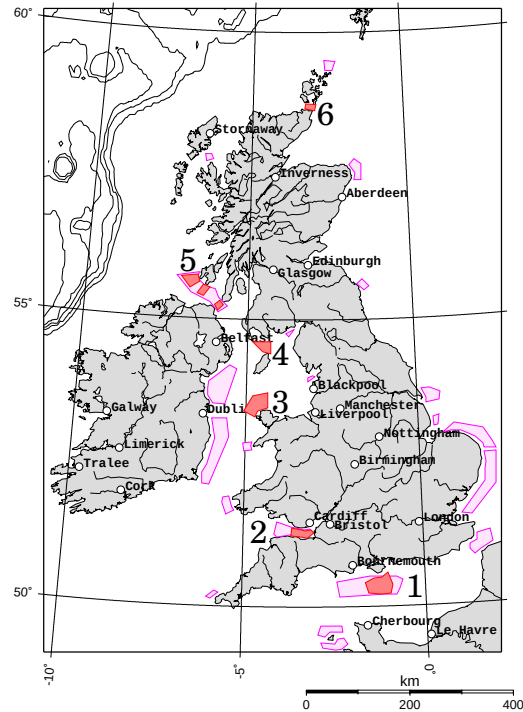


FIGURE G.7. Zones autour des îles britanniques dans lesquelles les flux de marée maximaux dépassent 1 m/s. Les six zones de couleur sombre ont été incluses dans le tableau G.8 :

- 1. la Manche (au nord de la presqu'île du Cotentin) ;
- 2. le canal de Bristol ;
- 3. au nord d'Anglesey ;
- 4. au nord de l'île de Man ;
- 5. entre l'Irlande du nord, le cap du Mull of Kintyre en Écosse, et l'île d'Islay ; et
- 6. le Pentland Firth (détroit entre les îles Orcades et l'Écosse), et entre les Orcades.

Il y a également d'énormes courants autour des îles anglo-normandes, mais comme elles ne sont pas gouvernées par le Royaume-Uni, je ne les ai pas prises en compte ici. Parmi les autres zones en tête de liste, on trouve la mer du Nord, depuis la Tamise (à Londres) jusqu'à la Wash (Kings Lynn). Les lignes de niveau sous-marin montrent les profondeurs supérieures à 100 mètres. Les données de marée proviennent du *Reed's Nautical Almanac* et de l'Atlas du DTI sur les ressources énergétiques marines renouvelables du Royaume-Uni [Atlas of UK Marine Renewable Energy Resources] (2004).

des fermes marémotrices ne dépasse pas la puissance totale disponible. La figure G.7 montre les principaux sites autour des îles britanniques où les courants de marée sont puissants.

J'ai estimé les maxima typiques de courants en six zones où ces courants sont puissants, en consultant un annuaire des marées, le *Reed's Nautical Almanac*. (Ces estimations pourraient facilement être fausses de 30 %. Ai-je surestimé ou sous-estimé la superficie de ces zones ? Je n'ai pas étudié en détail la topographie de fonds marins ; je ne sais donc pas si toutes sont

Zone	U (nœuds)		densité de puiss. (W/m ²)	surface (km ²)	puissance moyenne (kWh/j/p)	d (m)	w (km)	puiss. brute	
	M	V						M	V
1	1,7	3,1	7	400	1,1	30	30	2,3	7,8
2	1,8	3,2	8	350	1,1	30	17	1,5	4,7
3	1,3	2,3	2,9	1 000	1,2	50	30	3,0	9,3
4	1,7	3,4	9	400	1,4	30	20	1,5	6,3
5	1,7	3,1	7	300	0,8	40	10	1,2	4,0
6	5,0	9,0	170	50	3,5	70	10	24	78
Total					9				

(a)

(b)

TABLEAU G.8. (a) Estimations de puissance de marée, en supposant que les fermes exploitant les courants fonctionnent comme des fermes éoliennes. La densité de puissance est égale à la puissance moyenne par unité de surface de fond marin. Les six régions sont indiquées sur la figure G.7. M = Mortes-eaux. V = Vives-eaux. (b) A titre de comparaison, ce tableau montre l'estimation de la puissance brute entrante que donne l'équation G.1 en page 366.

v (m/s)	v (nœuds)	densité de puissance de frottement (W/m ²)		densité de puissance de la ferme marémotrice (W/m ²)
		$R_1 = 0,01$	$R_1 = 0,003$	
0,5	1	1,25	0,4	1
1	2	10	3	8
2	4	80	24	60
3	6	270	80	200
4	8	640	190	500
5	10	1 250	375	1 000

entièrement appropriées — certains endroits peuvent être trop profonds, pas assez, ou trop instables.

Une fois ces incertitudes admises, j’arrive à une estimation de puissance totale de **9 kWh/j par personne** pour les fermes exploitant les courants de marée. Cela correspond à 9 % de la puissance brute entrante mentionnée en page 98, qui était de 100 kWh par jour et par personne. (Extraire 1,1 kWh/j/pers dans le canal de Bristol, en zone 2, pourrait entrer en conflit avec production d’énergie par le barrage sur la Severn ; cela dépend de si la ferme marémotrice *ajoute* un frein significatif au frottement naturel préexistant créé par le canal, ou si elle le *remplace*.)

Estimer la ressource marémotrice par la friction sur le fond marin

Une autre manière d’estimer la puissance que peuvent fournir les marées est de calculer la valeur de la puissance déjà dissipée par friction sur le fond marin. Une couche de turbines placées juste au dessus du fond marin pourrait constituer un fond de substitution, opposant à peu près la même résistance au déplacement de l’eau que le véritable fond marin ; elle pourrait donc extraire à peu près la même quantité de puissance que celle que le frottement dissipait, sans changer fondamentalement les flux de marée.

Donc, quelle est la puissance dissipée par « frottement sur le fond » ? Malheureusement, il n’existe pas de modèle simple de friction sur le fond. Celui-ci dépend de la rugosité du fond marin, et du matériau dont il est constitué — et même avec ces informations, la formule correcte à utiliser n’est pas vraiment établie. Selon l’un des modèles les plus utilisés, l’ordre de grandeur de la résistance (force par unité de surface) est en $R_1 \rho U^2$, où U est la vitesse moyenne du flux et R_1 est une quantité sans dimension appelée le coefficient de frottement. On peut estimer la puissance dissipée par unité de surface en multipliant la résistance par la vitesse. Le tableau G.9 montre la puissance dissipée sous forme de frottement, $R_1 \rho U^3$, en supposant que $R_1 = 0,01$ or $R_1 = 0,003$.

TABLEAU G.9. Densité de puissance de friction $R_1 \rho U^3$ (en watts par mètre carré de fond marin) en fonction de la vitesse du courant d’eau, en supposant que $R_1 = 0,01$ ou $0,003$. Flather (1976) utilise $R_1 = 0,002$ 5 à $0,003$; Taylor (1920) utilise $R_1 = 0,002$. (1 nœud = 1 mille nautique par heure = $0,514$ m/s). La dernière colonne rappelle l’estimation de la puissance d’une ferme marémotrice du tableau G.6. Pour en savoir plus, voir Kowalik (2004), Sleath (1984).

Pour des valeurs du coefficient de frottement de cet ordre, cette puissance de frottement est proche de l'estimation de la puissance qu'une ferme marémotrice fournirait. C'est une bonne nouvelle, car cela suggère que planter une forêt d'hydroliennes au fond de la mer, espacées les unes des autres de cinq diamètres, ne modifiera pas radicalement le flux des marées. La friction naturelle a déjà un effet du même ordre.

Bassins marémoteurs avec pompage

« L'astuce du pompage » augmente artificiellement l'amplitude des marées dans un bassin marémoteur pour amplifier la puissance obtenue. Le coût énergétique du pompage pour injecter plus d'eau *dans* le bassin à marée haute est remboursé avec intérêts lorsque cette même eau quitte le bassin à marée basse ; de la même manière, de l'eau supplémentaire peut être *rejetée* par pompage à marée basse, puis admise à nouveau dans le bassin à marée haute. L'astuce du pompage est parfois utilisée à La Rance, ce qui augmente sa génération de puissance nette d'environ 10 % (Wilson et Balls, 1990). Calculons la limite théorique pour cette technologie. Je vais supposer que la génération a un rendement de $\epsilon_g = 0,9$ et que le pompage a un rendement de $\epsilon_p = 0,85$. Le marnage est égal à $2h$. Pour faire simple, je vais aussi supposer que les prix d'achat et de revente de l'électricité sont égaux en toute circonstance, de sorte que le surplus optimal de hauteur b au-dessus de la marée haute (hauteur sur laquelle de l'eau supplémentaire est pompée) est donné par (coût marginal d'un pompage supplémentaire = retour marginal de l'eau supplémentaire) :

$$b/\epsilon_p = \epsilon_g(b + 2h).$$

Si on définit le rendement de l'aller-retour de l'eau $\epsilon = 76\%$, on a :

$$b = 2h \frac{\epsilon}{1 - \epsilon}.$$

Par exemple, avec un marnage de $2h = 4$ m et un rendement aller-retour de $\epsilon = 76\%$, le surplus optimal de hauteur est de $b = 13$ m. Il s'agit de la hauteur maximum pour laquelle un pompage se justifie si le prix de l'électricité est constant.

Supposons que l'astuce inverse soit utilisée à marée basse. (Cela impose que le bassin fasse 30 mètres de hauteur totale !) La puissance délivrée par unité de surface est alors :

$$\left(\frac{1}{2} \rho g \epsilon_g (b + 2h)^2 - \frac{1}{2} \rho g \frac{1}{\epsilon_p} b^2 \right) / T,$$

où T est la durée qui s'écoule entre marée haute et marée basse. On peut exprimer ceci comme la densité de puissance maximum possible sans pompage, $\epsilon_g 2 \rho g h^2 / T$, à laquelle on applique le coefficient de surplus :

$$\left(\frac{1}{1 - \epsilon} \right),$$

amplitude h (m)	surplus de hauteur b (m)	puissance avec pompage (W/m ²)	puissance sans pompage (W/m ²)
1,0	6,5	3,5	0,8
2,0	13	14	3,3
3,0	20	31	7,4
4,0	26	56	13

amplitude h (m)	surplus de hauteur b (m)	puissance avec pompage (W/m ²)	puissance sans pompage (W/m ²)
1,0	1,0	1,6	0,8
2,0	2,0	6,3	3,3
3,0	3,0	14	7,4
4,0	4,0	25	13

TABLEAU G.10. Densité de puissance théorique pour la puissance marémotrice en utilisant l’astuce du pompage, en supposant qu’il n’existe pas de contrainte sur la hauteur des murs du bassin.

TABLEAU G.11. Densité de puissance offerte par l’astuce du pompage, en supposant que l’on contraint le surplus de hauteur à être égal à l’amplitude. Cette hypothèse s’applique par exemple lors des marées de mortes-eaux, si le pompage augmente l’amplitude marémotrice jusqu’à atteindre l’amplitude des marées de vives-eaux.

qui est en gros égal à un facteur 4.

Le tableau G.10 montre la densité de puissance théorique qui pourrait être fournie par pompage. Malheureusement, l’astuce du pompage sera rarement exploité à plein, en raison des contraintes économiques pour la construction du bassin : une exploitation totale du pompage impose une hauteur totale de bassin environ 4 fois plus grande que l’amplitude des marées, et elle multiplie par 4 la puissance délivré. Mais la quantité de matériaux pour construire une digue de hauteur H varie comme H^2 , ce qui signifie que le coût de construction du mur serait multiplié par bien plus que 4. Cet argent supplémentaire serait sans doute mieux investi dans un agrandissement horizontal du bassin marémoteur, plutôt que vertical.

L’astuce du pompage peut néanmoins être utilisé gratuitement, tous les jours pour lesquels l’amplitude de la marée naturelle est plus faible que l’amplitude maximum : de l’eau peut être pompée à marée haute pour monter son niveau jusqu’à la hauteur maximum du bassin. Le tableau G.11 donne la puissance fournie si le surplus de hauteur est fixé à h , c’est à dire si la hauteur du bassin est juste le double de l’amplitude naturelle.

Multiplier par deux l’amplitude naturelle est chose facile lors des marées de mortes-eaux, puisque l’amplitude de ces marées est environ la moitié de celle des marées de vives-eaux. Pomper de l’eau dans le bassin lors des marées de mortes-eaux, de sorte que toute l’amplitude d’une marée de vives-eaux soit exploitée, permet aux marées de mortes-eaux de fournir à peu près deux fois plus de puissance que s’il n’y avait aucun pompage. Un système avec pompage présenterait donc des variations de puissance, toutes les deux semaines, d’un facteur de seulement 2 au lieu de 4.

Obtenir de la puissance marémotrice « en continu » grâce à deux bassins

Voici une idée qui ne manque pas de puissance : prenez deux bassins, qu'on appellera, pour l'un, le « bassin plein », et pour l'autre, le « bassin vide ». A chaque marée haute, on remplit le « bassin plein » ; à marée basse, on vide le « bassin vide ». Ces remplissages et vidages successifs peuvent être effectués de manière passive au travers d'écluses, ou bien de manière forcée à l'aide de pompes (en utilisant l'astuce mentionnée précédemment). A chaque fois que de la puissance est requise, on laisse l'eau s'écouler du bassin plein au bassin vide, ou (ce qui est encore mieux en termes de puissance) entre l'un des bassins et la mer. Le coût en capital d'un système à deux bassins est sans doute plus important du fait des digues supplémentaires à construire ; mais on y gagne énormément parce que la puissance devient disponible en permanence, ce qui veut dire que cette production de puissance peut suivre la demande.

On peut utiliser la puissance générée par le bassin vide pour pomper de l'eau supplémentaire vers le bassin plein à marée haute, et, de la même manière exploiter la puissance provenant du bassin plein pour abaisser le niveau du bassin vide par pompage à marée basse. Ce système d'auto-pompage augmenterait la puissance totale fournie par l'installation sans même avoir besoin d'acheter de l'énergie sur le réseau électrique. Cette solution à deux bassins présente une particularité des plus élégantes : le moment optimal pour *pomper* l'eau vers le bassin haut se trouve être à marée haute, qui s'avère être aussi le meilleur moment pour *générer* de la puissance par le bassin bas. Réciproquement, la marée basse est le meilleur moment à la fois pour pomper et vider le bassin bas, et pour générer de la puissance du bassin haut. Par une simulation simple, j'ai trouvé que sur un site dont le marnage naturel est de 4 mètres, un système à deux lagons peut, avec une planification adéquate du pompage, fournir *en continu* une puissance de $4,5 \text{ W/m}^2$ (MacKay, 2007a). Le niveau d'eau de l'une des lagunes est maintenu en permanence au dessus du niveau moyen de la mer, tandis que le niveau de l'eau dans l'autre lagon est maintenu en permanence en dessous du niveau moyen de la mer. Cette densité de puissance de $4,5 \text{ W/m}^2$ est de 50 % supérieure à la densité de puissance moyenne maximum possible d'un bassin marémoteur ordinaire situé au même endroit (3 W/m^2). La puissance stable fournie par ce système de lagunes aurait plus de valeur que la puissance intermittente et moins souple d'un bassin marémoteur ordinaire.

Un système à deux bassins pourrait aussi fonctionner comme une installation de stockage par pompage.

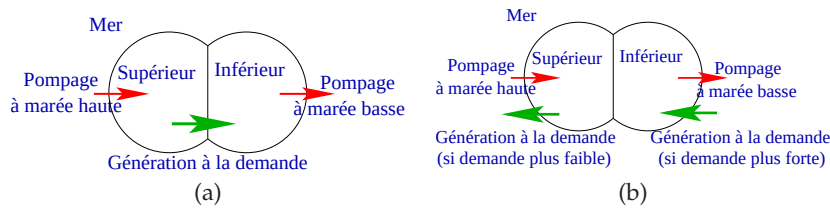


FIGURE G.12. Différentes manières d'utiliser l'astuce du pompage marémoteur. Deux lagunes sont situées au niveau de la mer. (a) Une manière simple d'utiliser deux lagunes est d'en appeler une bassin haut et l'autre bassin bas ; lorsque le niveau de la mer alentour est proche de la marée haute, on laisse l'eau entrer dans le bassin haut, voire on l'y aide en pompant (avec de l'électricité provenant d'autres sources) ; et de la même manière, lorsque le niveau de la mer est proche de la marée basse, on vide le bassin bas, soit de manière passive, soit par pompage ; quand le prix du kWh électrique est élevé, on peut générer de la puissance à la demande en laissant l'eau passer du bassin haut au bassin bas. (b) Une autre manière de faire qui pourrait délivrer encore plus de puissance par unité de surface et qui n'utilise aucun passage d'eau entre les deux lagons. Tandis que l'une des lagons est remplie ou vidée par pompage, l'autre lagon peut fournir au réseau électrique de la puissance en continu et qui suit la demande. Le pompage peut être alimenté par des sources très variables comme l'éolien, par de la puissance en réserve provenant du réseau (des centrales nucléaires, par exemple), ou de l'autre moitié de l'installation, en utilisant la puissance d'une lagon pour pomper l'eau à la hausse ou à la baisse dans l'autre lagon.

Notes et bibliographie

Page n°

- 365 *La superficie de l'estuaire de la Severn ... est d'environ 550 km².* A titre de comparaison, en France, la rade de Brest, la baie de Douarnenez, le golfe du Morbihan, l'estuaire de la Loire et celui de la Gironde ont des superficies respectives de 180, 385, 115, 217 et 635 km².
- 365 *Rendement de 90 %...* Les turbines ont un rendement d'environ 90 % lorsque leur charge hydraulique est d'au moins 3,7 mètres de hauteur. Baker et al. (2006).
- 376 *Obtenir de la puissance marémotrice « en continu » grâce à deux bassins.* Il existe une centrale marémotrice à deux bassins à Haishan, sur l'île chinoise de Maoyan. Un générateur unique situé entre les deux bassins, comme montré par la figure G.12(a), fournit de la puissance en continu, et génère en moyenne 39 kW. [2bqapk].

Pour en savoir plus : Shaw et Watson (2003b) ; Blunden et Bahaj (2007) ; Charlier (2003a) ; Charlier (2003b).

Pour en savoir plus sur le frottement de fond et la variation du flux en fonction de la profondeur, voir Sleath (1984).

Pour en savoir plus sur l'estimation de la ressource marémotrice au Royaume-Uni, voir MacKay (2007b).

Pour en savoir plus sur les lagons marémoteurs, voir MacKay (2007a).

H Les trucs II

L'énergie importée

Dieter Helm et ses collègues ont estimé l'empreinte d'un kilogramme de produit importé depuis un pays X en utilisant l'intensité moyenne en carbone de l'économie du pays X (c'est-à-dire le rapport entre ses émissions de carbone et son produit national brut). Ils en ont conclu que le carbone incorporé dans les importations de la Grande-Bretagne était environ de 16 tonnes eq CO₂ par an et par personne (en toute logique, il faudrait sans doute ajouter cette empreinte des importations à l'empreinte carbone officielle de la Grande-Bretagne, qui est de 11 tonnes eq CO₂ par an et par personne). Une étude ultérieure plus détaillée, commandée par la DEFRA, a estimé que la quantité de carbone incorporée dans nos importations était plus faible, mais malgré tout très conséquente : environ 6,2 tonnes eq CO₂ par an et par personne. En termes d'énergie, 6 tonnes eq CO₂ par an reviennent à quelque chose comme 60 kWh/j.

Voyons ici si nous pouvons retrouver ces conclusions par un raisonnement différent, qui repose sur le poids des importations.

La figure H.2 montre les importations de la Grande-Bretagne en 2006 de trois façons : à gauche, la *valeur* totale des importations, répartie par pays d'origine. Au milieu, la même valeur financière est répartie par type de produit importé, en utilisant les catégories du Service des Revenus et Douanes de Sa Majesté. À droite, toutes les importations maritimes de la Grande-Bretagne sont indiquées par *poids* et réparties selon les catégories utilisées par le ministère des Transports, qui se moque de savoir s'il s'agit de cuir ou de tabac — ce qu'il note, c'est le poids des produits, sous forme sèche ou liquide, et s'ils sont arrivés par conteneur ou par camion.

Le coût énergétique des combustibles importés (en haut à droite) est *déjà* inclus dans la comptabilité standard de la consommation énergétique britannique ; les coûts énergétiques de toutes les autres importations ne le sont pas. Pour la plupart des matériaux, l'énergie incorporée par unité de poids est supérieure ou égale à 10 kWh par kg — ce qui correspond à l'énergie par unité de poids des combustibles fossiles. Ceci est vrai pour tous les métaux et alliages, tous les polymères et autres composés chimiques, la plupart des produits du papier, et beaucoup de céramiques, par exemple. Les exceptions sont les matériaux bruts comme les minerais ; les céramiques poreuses comme le béton, la brique et la porcelaine, dont le coût énergétique est 10 fois plus faible ; le bois et certains caoutchoucs ; et les verres, dont le coût énergétique est un poil en dessous de 10 kWh par kg. [x22oz]

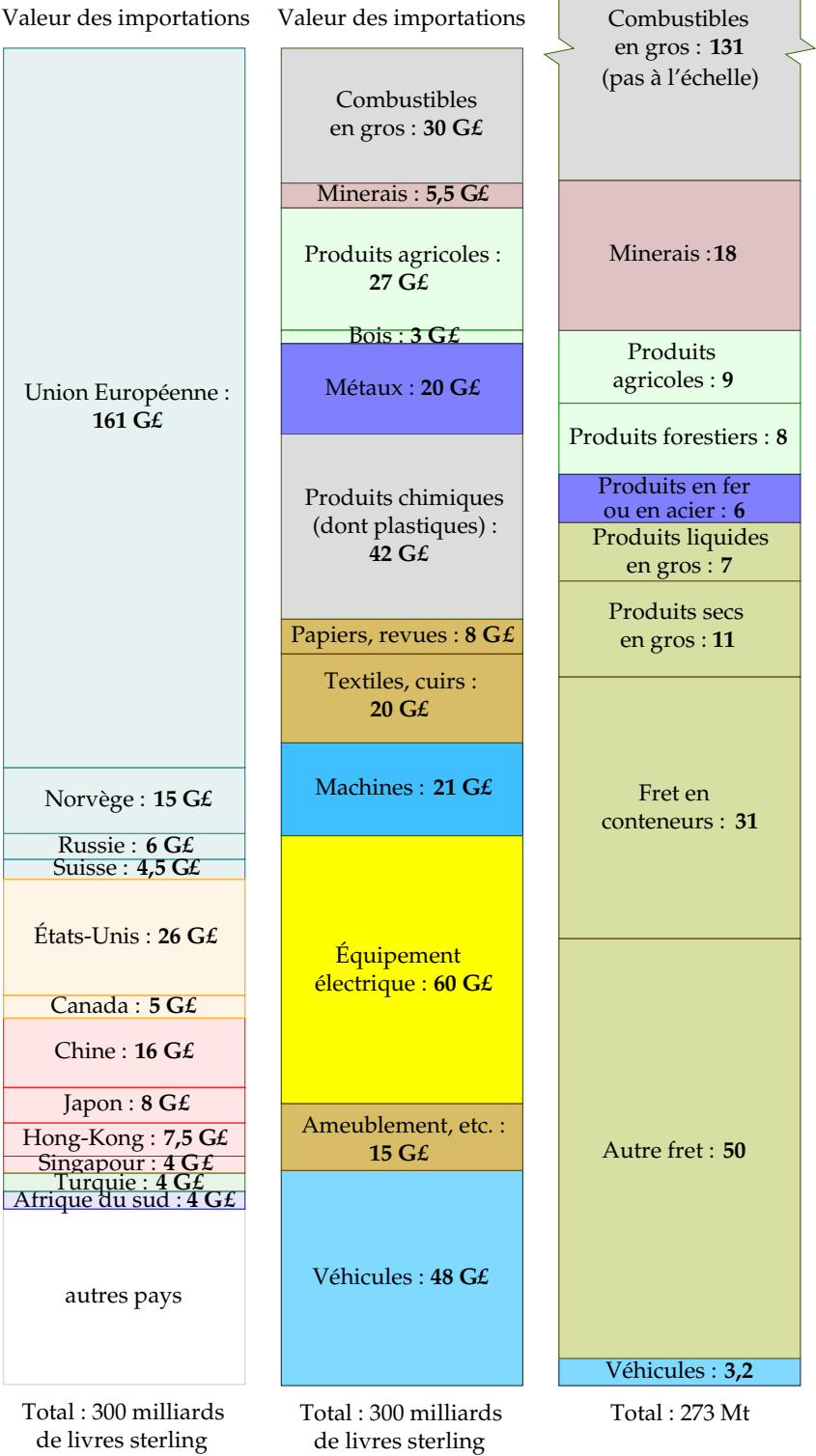
Nous pouvons donc obtenir une valeur approchée de l'empreinte énergétique de nos importations simplement en partant du poids des produits manufacturés, et en excluant des produits comme les minerais et le bois.



FIGURE H.1. Laminage en continu de bandes d'acier à la Korea Iron and Steel Company.

Poids des importations en Mt

FIGURE H.2. Importations de trucs au Royaume-Uni, en 2006.



Compte tenu du caractère approximatif des données dont nous partons, nous allons forcément faire des erreurs, et inclure par inadvertance certains objets faits de bois ou de verre. Mais on peut espérer que ces dérapages seront compensés par le fait que nous allons sous-estimer le contenu énergétique de la plupart des métaux et plastiques, et aussi celui d'objets plus complexes, dont beaucoup ont une énergie incorporée, non pas de 10, mais de 30 kWh par kg, si ce n'est plus encore.

Pour faire ce calcul, je vais prendre dans la colonne de droite de la figure H.2 les produits en fer et en acier, les produits secs en gros, le fret en conteneur et « l'autre fret », ce qui, au total, fait 98 millions de tonnes par an. Je laisse les véhicules à part pour le moment. De ce total, je soustrais une quantité estimée à 25 millions de tonnes de nourriture qui se cache probablement dans le catégorie « autre fret » (34 millions de tonnes d'aliments ont été importées en 2006), ce qui nous laisse 73 millions de tonnes.

Si l'on convertit ces 73 millions de tonnes en énergie en utilisant le facteur suggéré ci-dessus, et qu'on les répartit entre 60 millions de personnes, on peut estimer que ces importations incorporent une énergie de 33 kWh/j par personne.

Pour les voitures, on peut faire ce calcul un peu moins à la louche, car nous en savons un peu plus : le nombre de véhicules importés en 2006 a été de 2,4 millions. Si nous utilisons le chiffre de 76 000 kWh pour la quantité d'énergie incorporée par voiture (un nombre que nous avons pris en page 107), alors ces voitures importées incorporent une énergie de 8 kWh/j par personne.

Je n'ai pas pris en compte les « produits liquides en gros » dans mon estimation parce que je ne suis pas sûr de savoir de quelle sorte de produits il s'agisse. S'il s'agit de produits chimiques sous forme liquide, leur contribution pourrait être non négligeable.

Nous sommes parvenus à une estimation finale de 41 kWh/j par personne pour l'énergie incorporée dans les importations — incontestablement du même ordre de grandeur que l'estimation de Dieter Helm et de ses collègues.

Je soupçonne que ce chiffre de 41 kWh/j par personne soit sous-estimé, car l'intensité énergétique que nous avons supposée (10 kWh par kg) est trop basse pour la plupart des types de biens manufacturés comme les machines-outils ou les appareils électriques. Cependant, sans connaître les poids de toutes les catégories importées, c'est la meilleure estimation que je puisse obtenir pour le moment.



FIGURE H.3. Une mine de niobium à ciel ouvert, au Brésil.

Analyse de cycle de vie pour les bâtiments

Les tableaux H.4 et H.5 nous montrent les estimations de l'énergie nécessaire à la fabrication de divers matériaux de construction, ainsi que celle nécessaire à la construction proprement dite. Ceci inclut l'énergie utilisée pour transporter les matériaux bruts jusqu'à l'usine, mais pas l'énergie

Matériau	Énergie incorporée	
	(MJ/kg)	(kWh/kg)
Bois tendre séché au four	3,4	0,94
Bois dur séché au four	2,0	0,56
Bois dur séché à l'air	0,5	0,14
Panneau d'aggloméré	24,2	6,7
Panneau de particules	8,0	2,2
Panneau de fibres « medium »	11,3	3,1
Contreplaqué	10,4	2,9
Lamellé-collé	11	3,0
Stratifié	11	3,0
Paille	0,24	0,07
Terre stabilisée	0,7	0,19
Bloc de granite importé	13,9	3,9
Bloc de granite local	5,9	1,6
Plâtre	2,9	0,8
Placoplâtre	4,4	1,2
Fibre-ciment	4,8	1,3
Ciment	5,6	1,6
Béton fabriqué sur site	1,9	0,53
Béton préfabriqué étuvé	2,0	0,56
Béton préfabriqué érigé	1,9	0,53
Briques de terre cuite	2,5	0,69
Parpaings en béton	1,5	0,42
Béton aéré en autoclave	3,6	1,0
Plastique — en général	90	25
PVC	80	22
Caoutchouc synthétique	110	30
Peinture acrylique	61,5	17
Verre	12,7	3,5
Fibre de verre (laine de verre)	28	7,8
Aluminiumaluminium	170	47
Cuivre cuivre	100	28
Acier galvanisé	38	10,6
Acier inoxydable	51,5	14,3

TABLEAU H.4. Énergie incorporée dans les matériaux de construction (en considérant l'emploi de matériaux vierges et non de produits recyclés). (Les blocs de pierre sont faits de pierre naturelle sélectionnée ou taillée à des dimensions ou des formes spécifiques.)
Sources : [3kmcks], Lawson (1996).



	Énergie incorporée (kWh/m²)
Murs	
Montants bois, panneaux bois, revêtement placoplâtre	52
Montants bois, parement brique, revêtement placoplâtre	156
Montants bois, panneaux aluminium, revêtement placoplâtre	112
Montants acier, parement brique, revêtement placoplâtre	168
Double mur de brique en terre cuite, revêtement placoplâtre	252
Terre compressée stabilisée au ciment	104
Sols	
Plancher surélevé en bois	81
Chape de béton de 110 mm d'épaisseur sur le sol	179
Plancher rempli de 200 mm, sur poutrelles de béton préfabriquées	179
Toits	
Charpente bois, tuiles béton, plafond placoplâtre	70
Charpente bois, tuiles terre cuite, plafond placoplâtre	75
Charpente bois, toiture bac acier, plafond placoplâtre	92

TABLEAU H.5. Énergie incorporée dans divers murs, planchers, et toits. Sources : [3kmcks], Lawson (1996).

	Surface (m²)	×	densité énergétique (kWh/m²)	=	énergie (kWh)
Planchers	100	×	81	=	8 100
Toit	75	×	75	=	5 600
Murs extérieurs	75	×	252	=	19 000
Murs intérieurs	75	×	125	=	9 400
Total					42 000

TABLEAU H.6. Énergie requise pour la construction d'une maison de 4 pièces.

pour transporter le produit fini jusqu'au site de construction.

Le tableau H.6 utilise ces chiffres pour estimer l'énergie de fabrication requise pour construire une maison de 4 pièces. La quantité d'énergie brute nécessaire va au-delà, et inclut l'énergie incorporée dans l'infrastructure urbaine, par exemple l'énergie incorporée dans les machines qui produisent les matériaux bruts. En règle générale, on obtient grossièrement l'énergie nécessaire brute d'un bâtiment en multipliant par deux la quantité d'énergie nécessaire à sa construction [3kmcks].

En répartissant 42 000 kWh sur 100 ans, et en les multipliant par deux pour estimer le coût énergétique brut, l'énergie totale incorporée dans une maison s'élève à environ 2,3 kWh/j. Il ne s'agit que du coût énergétique de l'enveloppe de la maison : briques, tuiles et poutres.

Notes et bibliographie

Page n°

378 *Une étude ultérieure plus détaillée, commandée par la DEFRA, a estimé que la quantité de carbone incorporée dans nos importations était plus faible, mais malgré tout très conséquente : environ 6,2 tonnes eq CO₂ par an et par personne. Wiedmann et al. (2008).*

Pour en savoir plus : www.greenbooklive.com présente des évaluations de cycle de vie des matériaux de construction.

Quelques conseils de prudence utiles au sujet des analyses de cycle de vie : www.gdrc.org/uem/lca/life-cycle.html.

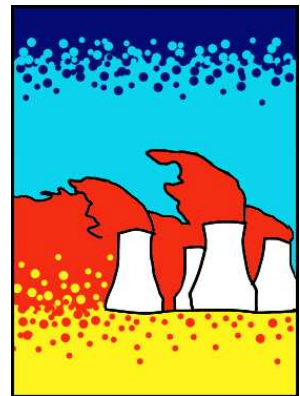
Liens additionnels : www.epa.gov/ord/NRMRL/lcaccess/resources.htm.



FIGURE H.7. Le viaduc de Millau, en France, le plus haut pont du monde à ce jour. Fait d'acier et de béton, long de 2,5 km et haut de 353 m.

Quatrième partie

Données utiles



I Référence rapide

Unités du Système International

Le **watt** est une unité dérivée du système international (SI) pour la puissance, nommée d’après le nom du physicien écossais James Watt. Comme toutes les unités SI dont le nom est tiré de celui d’une personne, la première lettre de son symbole s’écrit en majuscule (W). Mais lorsqu’une unité SI est écrite en toutes lettres, elle l’est toujours en minuscules (« watt »), à l’exception du « degré Celsius ».

d’après Wikipédia en anglais

SI signifie « Système International ». Les unités SI sont celles qu’utilisent tous les ingénieurs (du moins ceux qui veulent éviter de perdre une sonde spatiale).

Unités SI			préfixe	kilo	méga	giga	téra	péta	exa
énergie	un joule	1 J	symbole	k	M	G	T	P	E
puissance	un watt	1 W	facteur	10 ³	10 ⁶	10 ⁹	10 ¹²	10 ¹⁵	10 ¹⁸
force	un newton	1 N							
longueur	un mètre	1 m	préfixe	centi	milli	micro	nano	pico	femto
temps	une seconde	1 s	symbole	c	m	μ	n	p	f
température	un kelvin	1 K	facteur	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁶	10 ⁻⁹	10 ⁻¹²	10 ⁻¹⁵

TABLEAU I.1. Unités et préfixes définis par le Système International des Unités (SI).

Mes unités favorites pour l’énergie, la puissance, et le rendement du transport

Mes unités favorites, exprimées en unités SI			
énergie	un kilowatt-heure	1 kWh	3 600 000 J
puissance	un kilowatt-heure par jour	1 kWh/j	(1 000/24) W $\simeq$ 40 W
force	un kilowatt-heure pour 100 km	1 kWh/100 km	36 N
temps	une heure	1 h	3 600 s
	un jour	1 j	$24 \times 3\,600\text{ s} \simeq 10^5\text{ s}$
	un an	1 an	$365,25 \times 24 \times 3\,600\text{ s} \simeq \pi \times 10^7\text{ s}$
force par unité de masse	kilowatt-heure par tonne-kilomètre	1 kWh/t-km	$3,6\text{ m/s}^2 (\simeq 0,37 \times g)$

Unités et symboles supplémentaires

chose mesurée	nom d'unité	symbole	valeur
humains	personne	pers.	
masse	tonne	t	1 t = 1 000 kg
	gigatonne	Gt	1 Gt = 10 ⁹ × 1 000 kg = 1 Pg
transport	personne-kilomètre	pers-km	
transport	tonne-kilomètre	t-km	
volume	litre	L	1 L = 0,001 m ³
surface	kilomètre carré	km ²	1 km ² = 10 ⁶ m ² = 100 ha
	hectare	ha	1 ha = 10 ⁴ m ²
	Pays de Galles		1 Pays de Galles = 21 000 km ²
	Londres (Grand Londres)		1 Londres = 1 580 km ²
	Département français		1 département français ≈ 5 000 km ²
énergie	Dinorwig		1 Dinorwig = 9 GWh

Millions, milliards, billions, et préfixes fréquemment utilisés

Tout au long de ce livre, comme partout en Europe continentale, « un milliard » est un millier de millions, c’est-à-dire 10⁹, et « un billion » est un millier de milliards, c’est-à-dire 10¹². Le préfixe standard qui veut dire « milliard de » est « giga », et celui qui veut dire « billion de » est « téra ».

Attention cependant : vous risquez de trouver ici ou là de mauvaises traductions de l’anglais, qui parleront de « billions » pour désigner des milliards, et de « trillions » pour désigner des milliers de milliards — car c’est ce que signifient ces mots en anglais. Si d’autres que vous font la confusion, veuillez à ne pas tomber dans le piège.

L’abréviation « m » est souvent utilisée, à tort, pour signifier « million de ». Mais cela ne correspond pas au sens que lui donne le Système International — pensez aux mg (milligrammes), par exemple. N’utilisez donc jamais un « m » minuscule pour signifier « million de », mais un « M » majuscule. Par exemple, on peut écrire « Mtep » pour parler de « millions de tonnes équivalent pétrole », et « Mt CO₂ » pour « millions de tonnes de CO₂ ».

Unités qui prêtent à confusion

Il y a toute une série d’unités d’usage courant qui, pour des raisons diverses, portent à confusion. J’ai fini par trouver ce que certaines d’entre elles signifiaient, et je les ai listées ci-dessous, pour vous aider à les traduire lorsque vous les rencontrerez dans les médias.

Foyers

Le « foyer » est une unité couramment utilisée pour décrire la puissance produite par des installations de production d’énergie renouvelable. Par

exemple, « les 140 turbines de la ferme éolienne de Whitelee, d'un coût de 375 millions d'euros produiront 322 MW — assez pour alimenter 200 000 foyers. » Le « foyer » est défini par l'Association britannique pour l'énergie éolienne comme étant égal à une puissance de **4 700 kWh par an** [www.bwea.com/ukwed/operational.asp]. Cela fait 0,54 kW, ou **13 kWh par jour**. (Quelques autres organisations utilisent 4 000 kWh/an par foyer.)

Cette notion de « foyer » me gêne, parce que je crains que les gens la confondent avec *la puissance totale que consomment les occupants d'un foyer* — cette dernière est, en fait, environ 24 fois plus grande. L'unité « foyer » couvre uniquement la consommation domestique moyenne d'électricité d'un foyer. Pas le chauffage de ce foyer. Ni le chauffage du lieu de travail des occupants de ce foyer. Ni leur transport. Ni tout ce que la société peut faire pour eux et qui consomme aussi de l'énergie.

Soit dit en passant, lorsqu'on entend parler « d'émissions de CO₂ d'un foyer », le taux de conversion officiel semble être de 4 tonnes de CO₂ par foyer et par an.

Centrales électriques, centrales nucléaires

Les idées pour économiser l'énergie sont parfois décrites sous la forme d'un nombre de centrales électriques ou de centrales nucléaires. Par exemple, selon un article de la BBC sur le fait de remplacer les ampoules des feux de circulation par des LED qui durent beaucoup plus longtemps, « la quantité d'énergie économisée serait énorme — laisser les feux de circulation allumés en permanence consomme l'équivalent de deux centrales électriques de puissance moyenne. » [news.bbc.co.uk/1/low/sci/tech/specials/sheffield_99/449368.stm]

Ça fait combien, une centrale électrique de puissance moyenne ? 10 MW ? 50 MW ? 100 MW ? 500 MW ? Je n'en ai aucune idée. Une recherche sur Google indique que pour certains, c'est 30 MW ; pour d'autres, c'est 250 MW ; pour d'autres encore, c'est 500 MW (c'est le choix le plus courant) ; et on trouve même 800 MW. Quelle unité d'une inutilité totale !

La situation est similaire pour l'unité « centrale nucléaire », même dans les pays comme la France, car tous les réacteurs nucléaires n'ont pas la même puissance, et en pratique, les centrales regroupent souvent plusieurs réacteurs au même endroit.

Il serait certainement plus clair pour tout le monde si l'article sur les feux de circulation exprimait ce qu'il veut exprimer sous forme d'un pourcentage : « laisser les feux de circulation allumés en permanence consomme 11 MW d'électricité, c'est-à-dire 0,03 % de l'électricité britannique. » Cela montrerait à quel point les économies de puissance (et non d'énergie) sont vraiment « énormes ».

La figure I.2 montre la puissance produite par les 19 centrales électriques au charbon du Royaume-Uni.

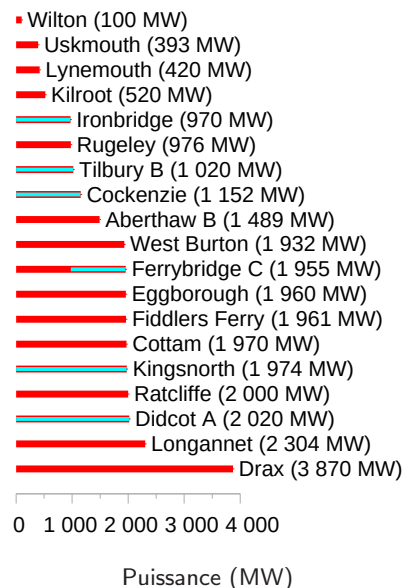


FIGURE I.2. Puissances des centrales électriques au charbon en Grande-Bretagne. J'ai mis en bleu les 8 GW de capacité de production qui fermeront d'ici 2015. 2 500 MW, partagés par l'ensemble des Britanniques, correspond à 1 kWh par jour et par personne.

Voitures en moins sur les routes

Certaines publicités parlent de réduction d'émissions de CO₂ en termes de « nombre de voitures en moins sur la route ». Par exemple, Richard Branson a dit que si la flotte de trains Virgin consommait 20 % de son carburant sous forme de biodiesel — soit dit en passant, vous ne trouvez pas choquant, vous, d'appeler un train à moteur Diesel un « train vert qui roule au biodiesel » alors qu'en fait, il roule à 80 % aux combustibles fossiles et seulement à 20 % au biodiesel ? — désolé, je me suis laissé distraire. Richard Branson a dit que *si* la flotte de trains Virgin consommait 20 % de son carburant sous forme de biodiesel — j'insiste sur le « *si* » parce que ce cher Richard attire toujours les micros lorsqu'il annonce *envisager* de faire des choses positives, y compris lorsque certaines de ces initiatives, annoncées en fanfare, sont ensuite discrètement enterrées, comme par exemple l'idée de remorquer les avions sur les pistes des aéroports pour les rendre plus verts — désolé, je me suis encore laissé distraire. Richard Branson, disais-je donc, a dit que *si* la flotte de trains Virgin consommait 20 % de son carburant sous forme de biodiesel, cela ferait baisser de 34 500 tonnes par an les émissions de CO₂, ce qui équivaut à « 23 000 voitures en moins sur les routes ». Cette phrase révèle le taux de conversion utilisé :

« une voiture en moins sur la route » $\longleftrightarrow$ -1,5 tonnes par an de CO₂.

Calories

L'unité « calorie » prête à confusion parce que dans le langage courant, tout le monde appelle une kilocalorie une « Calorie ».

1 « Calorie » de nourriture = 1 000 calories.

2 500 kcal = 3 kWh = 10 000 kJ = 10 MJ.

Barils

Voilà une unité qui prête à confusion et qu'adorent les spécialistes du pétrole — avec la tonne de pétrole. Est-ce si difficile de se contenter d'une seule unité ? Un baril de pétrole vaut 6,1 GJ ou 1 700 kWh.

En fait, le baril prête doublement à confusion, parce qu'il en existe plusieurs définitions, toutes avec des volumes différents.

Voici tout ce que vous devez savoir à propos des barils de pétrole. Un baril fait 42 gallons U.S., ou 159 litres. Un baril de pétrole, c'est 0,1364 tonnes de pétrole. Un baril de pétrole brut renferme une énergie de 5,75 GJ, soit 1 600 kWh. Un baril de pétrole pèse 136 kg. Une tonne de pétrole brut est égale à 7,33 barils et renferme une énergie de 42,1 GJ (soit 11 700 kWh). Le taux de pollution au carbone du pétrole brut est de 400 kg de CO₂ par baril. [www.chemlink.com.au/conversions.htm] Cela signifie que lorsque le prix du pétrole est de \$100 par baril, l'énergie du pétrole coûte \$0,06 par kWh. S'il y avait une taxe carbone de \$250 par tonne de CO₂ sur les combustibles fossiles, cette taxe augmenterait le prix d'un baril de pétrole de \$100.

Gallons

Le gallon pourrait être une unité bien sympathique, si les Yankees ne s'étaient pas amusés à la définir différemment de tout le monde — comme ils l'ont fait pour la pinte et le quart, d'ailleurs. Pour les Américains, ces unités de volume font en gros cinq sixièmes des volumes de même nom dans le reste du monde.

1 gallon US = 3,785 L = 0,83 gallon impérial. 1 gallon impérial = 4,545 L.

Les tonnes chez les anglo-saxons

Les tonnes peuvent parfois prêter à confusion, parce que dans les pays anglo-saxons, il existe des petites tonnes (« *short tons* »), des grandes tonnes (« *long tons* ») et des tonnes métriques (« *metric tons* »). En Europe continentale, on n'utilise que la tonne métrique, définie par le Système International. Mais en fait, toutes ces tonnes sont si proches qu'on peut se permettre de ne pas faire la distinction entre elles. 1 petite tonne = 907 kg ; 1 grande tonne = 1 016 kg ; 1 tonne métrique (ou tonne) = 1 000 kg.

BTU et quads

Les « unités thermiques britanniques » (« *British thermal units* » ou BTU) prêtent à confusion à la fois parce qu'elles ne font pas partie du *Système International*, et que leur petite taille ne les rend pas très utiles. Tout comme l'inutile joule, le BTU est trop petit, de sorte qu'on est obligé d'y ajouter un préfixe compliqué (« quadrillion de », dans le sens anglo-saxon qui plus est, ce qui prête encore plus à confusion, parce qu'en fait, il s'agit d'un million de milliards, soit 10^{15}) pour les rendre d'une quelconque utilité.

1 kJ est égal à 0,947 BTU. 1 kWh est égal à 3 409 BTU.

Un « quad » est égal à un million de milliards (10^{15}) de BTU, soit 293 TWh.

Unités bizarres

Tasses de thé

On sait les Anglais fondus de thé, mais est-ce que ce qui suit montre les panneaux solaires sous un jour vraiment très favorable ? « Une fois les 7 000 panneaux photovoltaïques installés, ils devraient générer 180 000 unités d'électricité renouvelable chaque année — suffisamment d'énergie pour faire chauffer **neuf millions de tasses de thé**. » Une telle annonce établit l'équivalence : 1 kWh égale 50 tasses de thé.

En tant qu'unité de volume pour la cuisine, la tasse (la moitié d'une pinte) vaut officiellement un quart de litre ; mais en pratique, une tasse de thé ou de café fait généralement moins, autour de 0,18 L. Pour porter 50 tasses remplies d'eau de 15 °C à 100 °C, en comptant 0,18 L par tasse, il faut 1 kWh.

Par conséquent, dit autrement, « neuf millions de tasses de thé par an », c'est juste « 20 kW ».

Bus à impériale, stades Albert Halls et de Wembley

« Si chaque Britannique en mesure de le faire isolait les murs creux de son habitation, on pourrait réduire nos émissions de dioxyde de carbone de 7 millions de tonnes — c’est énorme ! Cela remplirait près de 40 millions de bus à impériale, ou 900 fois le nouveau stade de Wembley ! »

Ce qui nous permet d’apprendre, au passage, qu’un stade de Wembley, ça ferait 44 000 bus à impériale. En fait, le volume intérieur de Wembley est de 1 140 000 m³.

« Si chaque foyer installait juste une ampoule à économie d’énergie, cela économiserait assez de dioxyde de carbone pour remplir 1 980 fois le Royal Albert Hall ! » (Un Albert Hall, ça fait 100 000 m³.)

Exprimer des quantités de CO₂ en volume plutôt qu’en masse, c’est une excellente manière de rendre les choses bien plus énormes qu’elles ne le sont en réalité. Si « 1 kg de CO₂ par jour », ça vous paraît trop petit, dites simplement « 200 000 litres de CO₂ par an » (notez au passage le subreptice changement d’unité de temps). C’est facile !

Encore des volumes

Un conteneur fait 2,4 mètres de large sur 2,6 mètres de haut par (6,1 ou 12,2) mètres de long (pour un volume de, respectivement, un ou deux EVP).

Un EVP est le volume standardisé d’un petit conteneur long de vingt pieds, soit 6,1 mètres — ce qui offre un volume intérieur d’environ 33 m³. La plupart des conteneurs que l’on voit aujourd’hui sont deux fois plus longs, et offrent un volume de 2 EVP. Un conteneur de 2 EVP pèse 4 tonnes et peut transporter 26 tonnes de marchandises ; son volume est de 67,5 m³.

Une piscine a un volume d’environ 3 000 m³.

Un bus à impériale a un volume de 100 m³.

Le ballon d’une montgolfière occupe environ 2 500 m³.

La grande pyramide de Gizeh a un volume de 2 500 000 mètres cubes.

Surfaces

La superficie de la surface terrestre est de 500 × 10⁶ km² ; la superficie des terres émergées est de 150 × 10⁶ km².

Un terrain de football typique a une surface d’un peu plus de 7 000 m².

Ma maison britannique typique, avec ses 3 chambres, a une surface habitable de 88 m². Aux États-Unis, la surface moyenne d’une maison qui héberge une famille est de 216 m².

masse de CO ₂ ↔ volume	
2 kg de CO ₂ ↔	1 m ³
1 kg de CO ₂ ↔	500 litres
44 g de CO ₂ ↔	22 litres
2 g de CO ₂ ↔	1 litre

TABLEAU 1.3. Conversion de volumes en masses.



FIGURE 1.4. Un conteneur d’un équivalent vingt pieds (1 EVP).

hectare	= 10 ⁴ m ²
kilomètre carré	= 100 ha
kilomètre carré	= 10 ⁶ m ²
département français	≈ 5 000 km ²
France	≈ 550 000 km ²

TABLEAU 1.5. Surfaces.

Usage de terres	surface par personne (m ²)	pourcentage
– bâtiments d’habitation	30	1,1
– jardins individuels	114	4,3
– autres bâtiments	18	0,66
– routes	60	22
– voies de chemin de fer	3,6	0,13
– chemins	2,9	0,11
– espaces verts	2 335	87,5
– eau	69	2,6
– autres usages de terres	37	1,4
Total	2 670	100

TABLEAU I.6. Superficies de terres, en Angleterre, dédiées à différents usages. Source : Base de données de statistiques sur l’usage généralisé des terres pour l’Angleterre, 2005. [3b7zdf]

1 000 BTU par heure	=	0,3 kW	=	7 kWh/j
1 cheval (1 ch)	=	0,75 kW	=	18 kWh/j
		1 kW	=	24 kWh/j
1 therm	=	29,31 kWh		
1 000 BTU	=	0,2931 kWh		
1 MJ	=	0,2778 kWh		
1 GJ	=	277,8 kWh		
1 tep (tonne équivalent pétrole)	=	11 630 kWh		
1 kcal	=	1,163×10 ⁻³ kWh		
1 kWh	=	0,03412 therms	3 412 BTU	3,6 MJ
			86×10 ⁻⁶ tep	859,7 kcal

CADRE I.7. Le rapport entre le kilowatt-heure, le kilowatt-heure par jour et d’autres unités de puissance et d’énergie.

Puissances

Quand on ajoute le suffixe « (e) » à une unité de puissance, cela veut dire que l’on parle explicitement de puissance électrique. Ainsi, par exemple, la production d’une centrale électrique peut être de 1 GW(e), alors que cette même centrale consomme de la puissance chimique à hauteur de 2,5 GW. De la même manière, on peut ajouter le suffixe « (th) » pour indiquer qu’il s’agit d’une puissance thermique (ou calorifique). On peut aussi ajouter les mêmes suffixes aux unités d’énergie. « Ma maison consomme 2 kWh(e) d’électricité par jour. »

Enfin, si c’est le suffixe « (c) » que l’on ajoute à l’unité de puissance, cela indique que l’on parle d’une puissance-crête (dite aussi « puissance de pointe »), ou capacité. Par exemple, 10 m² de panneaux peuvent avoir une puissance de 1 kW(c).

1 kWh/j = $\frac{1}{24}$ kW.

1 tep/an = 1,33 kW.

L'essence sort d'une pompe à essence à un rythme d'environ un demi-litre par seconde. Cela fait 5 kWh par seconde, ou 18 MW.

La puissance d'une Formule 1 est de 560 kW.

La consommation d'électricité britannique est de 17 kWh par jour et par personne, soit 42,5 GW par UK. Celle de la France est de 22 kWh par jour et par personne, soit 55 GW par France.

« Une tonne » de climatisation = 3,5 kW.

Consommation de puissance dans le monde

La consommation de puissance dans le monde est de 15 TW.

La consommation d'électricité mondiale est de 2 TW.

Facteurs de conversion bien utiles

Pour convertir des TWh/an en GW, il faut les diviser par 9.

1 kWh/j par personne, c'est la même chose que 2,5 GW par France, ou 22 TWh/an par France.

A la température ambiante, $1\text{ kT} = \frac{1}{40}\text{ eV}$

A la température ambiante, 1 kT par molécule = 2,5 kJ/mol.

Lecture du compteur

Pour convertir en kilowatts-heures ce que vous indique votre compteur de gaz, il suffit de prendre le nombre de **mètres cubes** indiqué, et de le multiplier par **11,42** pour obtenir le nombre de kWh.

Valeurs calorifiques de combustibles

Pétrole brut : 37 MJ/L ; 10,3 kWh/L.

Gaz naturel : 38 MJ/m³. (Le méthane a une densité de 1,819 kg/m³.)

1 tonne de charbon : 29,3 GJ ; 8 000 kWh.

L'énergie de fusion de l'eau ordinaire : 1 800 kWh par litre.

Voir aussi le tableau 26.14, page 235, et le tableau D.3, page 334.

Capacités calorifiques

La capacité calorifique de l'air est de 1 kJ/kg/°C, ou 29 J/mol/°C. La densité de l'air est de 1,2 kg/m³. La capacité calorifique de l'air par unité de volume est donc de 1,2 kJ/m³/°C.

La chaleur latente de la vaporisation de l'eau : 2 257,92 kJ/kg. La capacité calorifique de la vapeur d'eau : 1,87 kJ/kg/°C. La capacité calorifique de l'eau est de 4,2 kJ/L/°C.

La densité de la vapeur est de 0,590 kg/m³.

	kWh/t-km
fluvial	0,083
rail	0,083
camion	0,75
air	2,8
oléoduc	0,056
gazoduc	0,47
maritime, par conteneur	0,056
maritime, en gros	0,056
pétrolier	0,028

TABLEAU 1.8. Intensité en énergie de modes de transport aux États-Unis. Source : Weber et Matthews (2008).

Pression

Pression atmosphérique : 1 bar $\simeq 10^5$ Pa (pascals).
Pression sous 1 000 mètres d'eau : 100 bars.
Pression sous 3 000 mètres d'eau : 300 bars.

Argent

J'ai fait l'hypothèse des taux de change suivants lorsque je parlais d'argent : 1 € = \$1,25; £1 = \$1,85; \$1 = \$1,12 canadien. Ces taux de change étaient ceux valables mi-2006.

Facteurs de conversion pour les gaz à effet de serre

France	83
Suède	87
Canada	220
Autriche	250
Belgique	335
Union européenne	353
Finlande	399
Espagne	408
Japon	483
Portugal	525
Royaume-Uni	580
Luxembourg	590
Allemagne	601
États-Unis	613
Pays-Bas	652
Italie	667
Irlande	784
Grèce	864
Danemark	881

FIGURE I.9. Intensité en carbone de la production d'électricité (g CO₂ par kWh d'électricité).

Type de combustible	émissions (g CO ₂ par kWh d'énergie chimique)
gaz naturel	190
gaz de raffinerie	200
éthane	200
GPL	210
kérosène	240
essence	240
gazole/fioul	250
fioul lourd	260
naptha	260
coke (charbon)	300
charbon	300
coke de pétrole	340

FIGURE I.10. Émissions associées à la combustion (c'est-à-dire le fait de brûler des combustibles).
Source : DEFRA's Environmental Reporting Guidelines for Company Reporting on Greenhouse Gas Emissions.

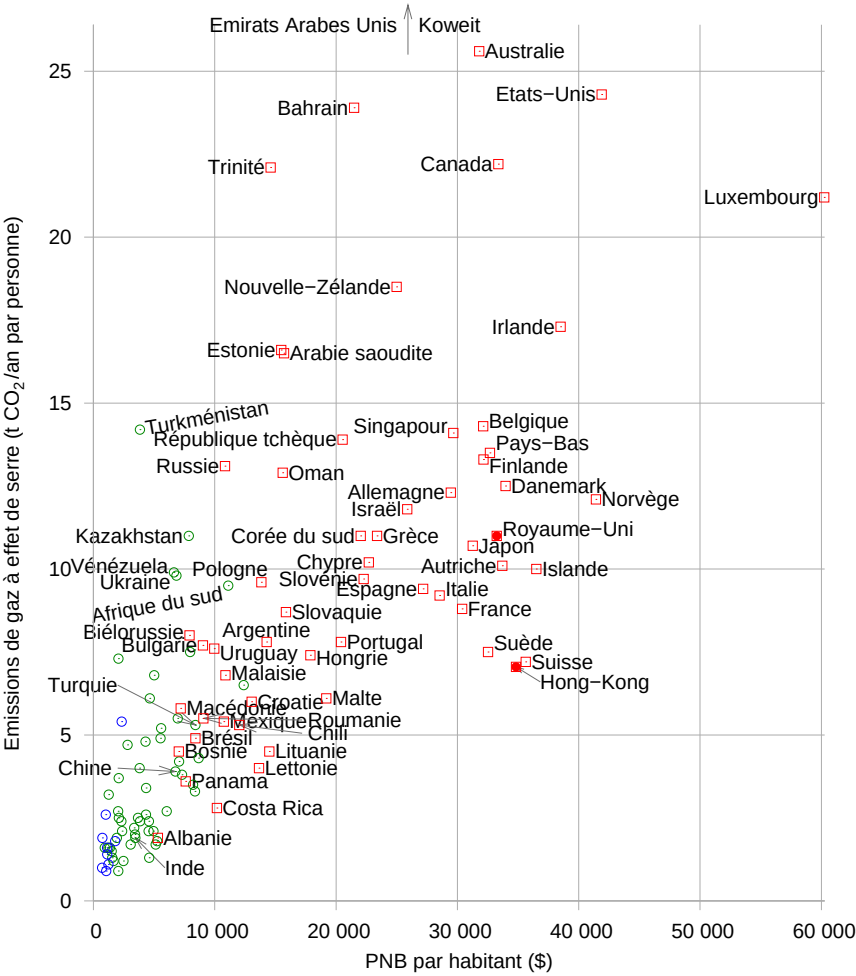


FIGURE 1.11. Émissions de gaz à effet de serre par habitant, comparées au PNB par habitant, en dollars US à parité de pouvoir d'achat. Les carrés indiquent les pays qui ont un « haut niveau de développement » ; les ronds, les pays qui ont un « niveau de développement moyen » ou « faible ». Voir aussi les figures 30.1 (page 274) et 18.4 (page 126). Source : Rapport sur le développement humain du PNUD, 2007. [[3av4s9]]

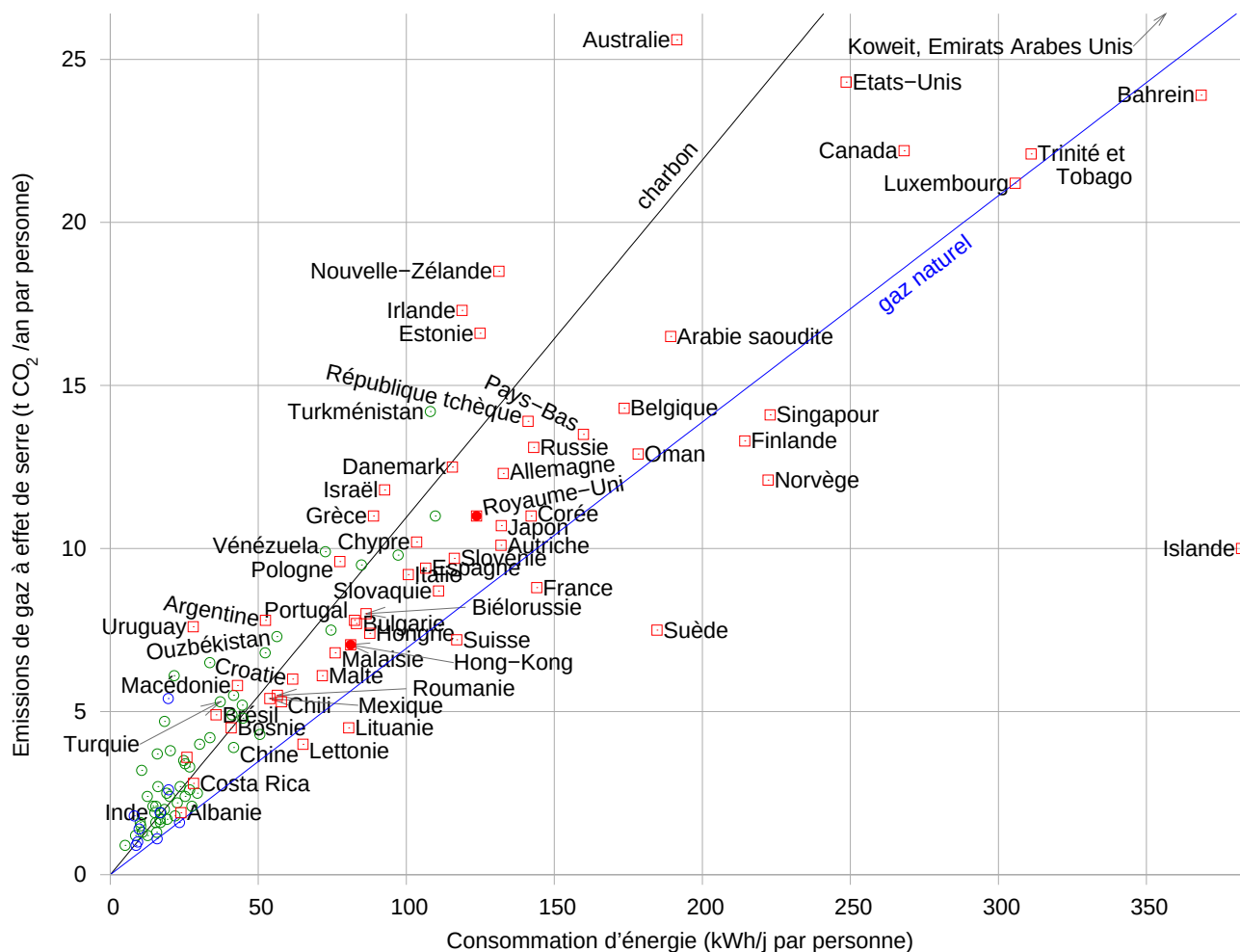


FIGURE I.12. Émissions de gaz à effet de serre par habitant, comparées à la consommation de puissance par habitant. Les deux lignes montrent les intensités en carbone du charbon et du gaz naturel. Les carrés indiquent les pays qui ont un « haut niveau de développement » ; les ronds, les pays qui ont un « niveau de développement moyen » ou « faible ». Voir aussi les figures 30.1 (page 274) et 18.4 (page 126). Source : Rapport sur le développement humain du PNUD, 2007.

J Populations et superficies

Densités de population

La figure J.1 indique la superficie de plusieurs régions du monde par rapport à leurs populations respectives. Les diagonales de cette figure représentent des lignes de densités de population constantes. Le Bangladesh, situé sur l'avant-dernière diagonale à droite, a une densité de population de 1 000 habitants par kilomètre carré ; l'Inde, l'Angleterre, les Pays-Bas et le Japon ont une densité de population égale à un tiers de celle du Bangladesh : environ 350 habitants par km². Celle de nombreux pays européens, dont la France, est d'environ 100 habitants par km². À l'autre extrême, le Canada, l'Australie et la Libye ont des densités de population d'environ 3 habitants par km². La diagonale centrale, en rouge, indique la densité de population du monde : 43 habitants par kilomètre carré. De ce point de vue, les États-Unis se situent dans la moyenne : les 48 États contigus des États-Unis ont la même densité de population que l'ensemble du monde. Enfin, quelques régions comme la Russie, le Canada, l'Amérique Latine, le Soudan, l'Algérie, et l'Arabie Saoudite, sont particulièrement étendues et sont caractérisées par une densité de population inférieure à la moyenne.

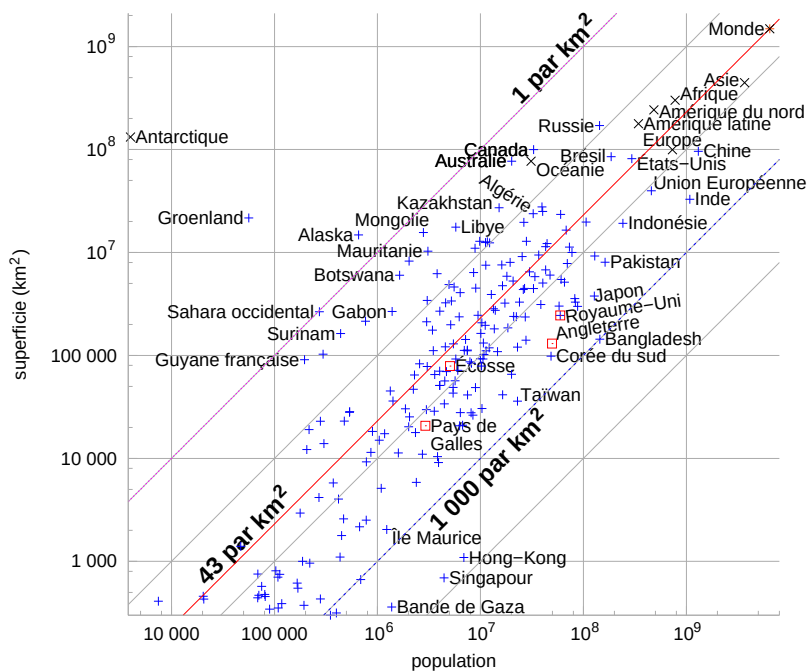


FIGURE J.1. Populations et superficies de divers pays et régions du monde. Les deux échelles sont logarithmiques. Chaque ligne correspond à une densité de population : les pays dont la densité de population est la plus forte sont situés à droite et en bas du cadre tandis que ceux dont la densité est la plus faible sont dans la partie haute et gauche. Ces données sont également disponibles sous forme de tableau en page 400.

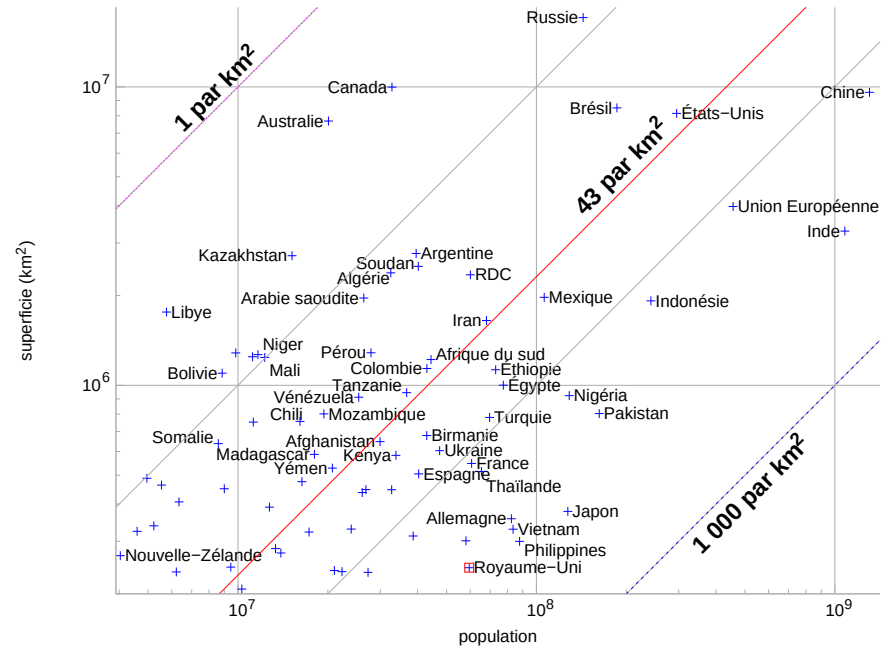


FIGURE J.2. Populations et superficies de divers pays et régions du monde. Les deux échelles sont logarithmiques. Les lignes représentent des densités de population constantes. Ce graphique est un zoom de la figure J.1 (page 397). Ces données sont également disponibles sous forme de tableau, en page 400.

Parmi ces pays, dont la proximité géographique avec la Grande-Bretagne pourraient nous inciter à nous rapprocher d’eux, on peut citer le Kazakhstan, la Libye, l’Arabie Saoudite, l’Algérie et le Soudan.

Région	Population	Superficie (km ²)	Habitants par km ²	Superficie par habitant (m ²)
Monde	6 440 000 000	148 000 000	43	23 100
Asie	3 670 000 000	44 500 000	82	12 100
Afrique	778 000 000	30 000 000	26	38 600
Europe	732 000 000	9 930 000	74	13 500
Amérique du nord	483 000 000	24 200 000	20	50 200
Amérique Latine	342 000 000	17 800 000	19	52 100
Océanie	31 000 000	7 680 000	4	247 000
Antarctique	4 000	13 200 000		

TABEAU J.3. Densités de population des continents. Ces données sont présentées également sur les graphiques J.1 et J.2. Elles datent de 2005.

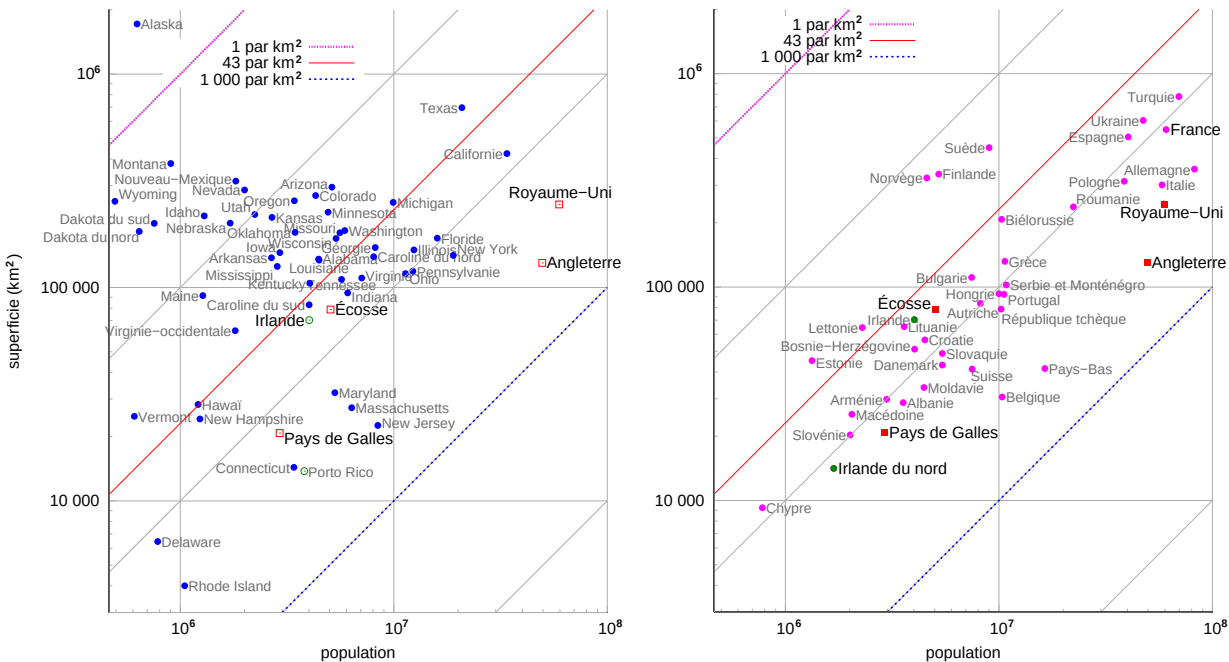


FIGURE J.4. Populations et superficies des États d'Amérique et de régions européennes.

Région	Population	Superficie (km ²)	Hab. par km ²	Superficie par habitant (m ²)	Région	Population	Superficie (km ²)	Hab. par km ²	Superficie par habitant (m ²)
Afghanistan	29 900 000	647 000	46	21 600	Kenya	33 800 000	582 000	58	17 200
Afrique	778 000 000	30 000 000	26	38 600	Lettonie	2 290 000	64 500	35	28 200
Afrique du sud	44 300 000	1 210 000	36	27 500	Libye	5 760 000	1 750 000	3,3	305 000
Alaska	655 000	1 480 000	0,44	2 260 000	Lituanie	3 590 000	65 200	55	18 100
Albanie	3 560 000	28 700	123	8 060	Macédoine	2 040 000	25 300	81	12 300
Algérie	32 500 000	2 380 000	14	73 200	Madagascar	18 000 000	587 000	31	32 500
Allemagne	82 400 000	357 000	230	4 330	Mali	12 200 000	1 240 000	10	100 000
Amérique du Nord	483 000 000	24 200 000	20	50 200	Malte	398 000	316	1 260	792
Amérique Latine	342 000 000	17 800 000	19	52 100	Mauritanie	3 080 000	1 030 000	3	333 000
Angleterre	49 600 000	130 000	380	2 630	Mexique	106 000 000	1 970 000	54	18 500
Angola	11 100 000	1 240 000	9	111 000	Moldavie	4 450 000	33 800	131	7 590
Antarctique	4 000	13 200 000			Monde	6 440 000 000	148 000 000	43	23 100
Arabie Saoudite	26 400 000	1 960 000	13	74 200	Mongolie	2 790 000	1 560 000	1,8	560 000
Argentine	39 500 000	2 760 000	14	69 900	Mozambique	19 400 000	801 000	24	41 300
Asie	3 670 000 000	44 500 000	82	12 100	Namibie	2 030 000	825 000	2,5	406 000
Australie	20 000 000	7 680 000	2,6	382 000	Nouvelle-Zélande	4 030 000	268 000	15	66 500
Autriche	8 180 000	83 800	98	10 200	Niger	11 600 000	1 260 000	9	108 000
Bande de Gaza	1 370 000	360	3 820	261	Nigéria	128 000 000	923 000	139	7 170
Bangladesh	144 000 000	144 000	1 000	997	Norvège	4 593 000	324 000	14	71 000
Belgique	10 000 000	31 000	340	2 945	Océanie	31 000 000	7 680 000	4	247 000
Biélorussie	10 300 000	207 000	50	20 100	Pakistan	162 000 000	803 000	202	4 940
Birmanie	42 900 000	678 000	63	15 800	Pays-Bas	16 400 000	41 500	395	2 530
Bolivie	8 850 000	1 090 000	8	124 000	Pays de Galles	2 910 000	20 700	140	7 110
Bosnie-Herzégovine	4 020 000	51 100	79	12 700	Pérou	27 900 000	1 280 000	22	46 000
Botswana	1 640 000	600 000	2,7	366 000	Philippines	87 800 000	300 000	292	3 410
Brésil	186 000 000	8 510 000	22	45 700	Pologne	39 000 000	313 000	124	8 000
Bulgarie	7 450 000	110 000	67	14 800	Portugal	10 500 000	92 300	114	8 740
Canada	32 800 000	9 980 000	3,3	304 000	R.D. du Congo	60 000 000	2 340 000	26	39 000
Chili	16 100 000	756 000	21	46 900	Rép. Centrafricaine	3 790 000	622 000	6	163 000
Chine	1 300 000 000	9 590 000	136	7 340	Rép. Tchèque	10 200 000	78 800	129	7 700
Colombie	42 900 000	1 130 000	38	26 500	Roumanie	22 300 000	237 000	94	10 600
Corée du sud	48 400 000	98 400	491	2 030	Royaume-Uni	59 500 000	244 000	243	4 110
Croatie	4 490 000	56 500	80	12 500	Russie	143 000 000	17 000 000	8	119 000
Danemark	5 430 000	43 000	126	7 930	Sahara occidental	273 000	266 000	1	974 000
Écosse	5 050 000	78 700	64	15 500	Serbie & Monténégro	10 800 000	102 000	105	9 450
Égypte	77 500 000	1 000 000	77	12 900	Singapour	4 420 000	693	6 380	156
Espagne	40 300 000	504 000	80	12 500	Slovaquie	5 430 000	48 800	111	8 990
Estonie	1 330 000	45 200	29	33 900	Slovénie	2 010 000	20 200	99	10 000
États-Unis (sauf Alaska)	295 000 000	8 150 000	36	27 600	Somalie	8 590 000	637 000	13	74 200
Éthiopie	73 000 000	1 120 000	65	15 400	Soudan	40 100 000	2 500 000	16	62 300
Europe	732 000 000	9 930 000	74	13 500	Suède	9 000 000	449 000	20	49 900
Finlande	5 220 000	338 000	15	64 700	Suisse	7 480 000	41 200	181	5 510
France	60 600 000	547 000	110	9 010	Surinam	438 000	163 000	2,7	372 000
Grèce	10 600 000	131 000	81	12 300	Taiwan	22 800 000	35 900	636	1 570
Groenland	56 300	2 160 000	0,026	38 400 000	Tanzanie	36 700 000	945 000	39	25 700
Hong-Kong	6 890 000	1 090	6 310	158	Tchad	9 820 000	1 280 000	8	130 000
Hongrie	10 000 000	93 000	107	9 290	Thaïlande	65 400 000	514 000	127	7 850
Inde	1 080 000 000	3 280 000	328	3 040	Turquie	69 600 000	780 000	89	11 200
Indonésie	241 000 000	1 910 000	126	7 930	Ukraine	47 400 000	603 000	78	12 700
Iran	68 000 000	1 640 000	41	24 200	Union européenne	496 000 000	4 330 000	115	8 720
Irlande	4 010 000	70 200	57	17 500	Vénézuela	25 300 000	912 000	28	35 900
Islande	296 000	103 000	2,9	347 000	Vietnam	83 500 000	329 000	253	3 940
Italie	58 100 000	301 000	192	5 180	Yémen	20 700 000	527 000	39	25 400
Japon	127 000 000	377 000	337	2 960	Zambie	11 200 000	752 000	15	66 800
Kazakhstan	15 100 000	2 710 000	6	178 000					

TABEAU J.5. Pays et régions du monde, et leur densité de population. Les populations supérieures à 50 millions de personnes et les superficies supérieures à 5 millions de km² sont surlignées. La figure J.1 (page 397) montre ces données de manière graphique. Les données datent de 2005.

K Historique énergétique au Royaume-Uni

Combustible primaire	kWh/j/pers	kWh(e)/j/pers
Pétrole	43	
Gaz naturel	47	
Charbon	20	
Nucléaire	9	→ 3,4
Hydroélectricité		0,2
Autres renouvelables		0,8

TABLEAU K.1. Analyse des sources d'énergie primaire au Royaume-Uni (2004-2006).

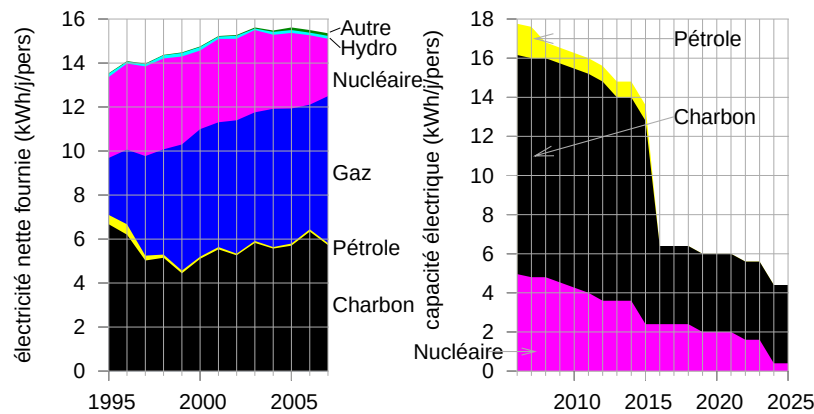


FIGURE K.2. A gauche : fourniture nette d'électricité au Royaume-Uni, par source, en kWh par jour et par personne. (0,9 kWh/j/pers supplémentaires sont générés et consommés par les générateurs eux-mêmes.) A droite : La chute de production énergétique provoquée par les fermetures des centrales électriques britanniques, telle que projetée par EDF. Ce graphique montre la *capacité* de production prévue pour les centrales nucléaires, au charbon et au fioul, en kilowatts-heures par jour et par personne. La capacité est la puissance maximum que peut fournir une source.

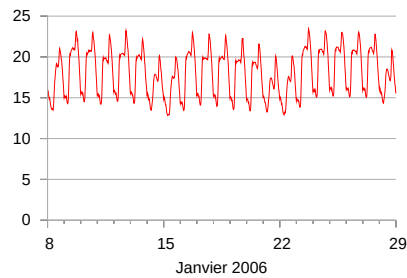


FIGURE K.3. Demande d'électricité en Grande-Bretagne (en kWh/j par personne) durant deux semaines de l'hiver 2006. Les pics en janvier ont lieu à 18 heures chaque jour. (Si vous voulez obtenir la demande nationale en gigawatts : le haut du graphique, 24 kWh/j par personne, équivaut à 60 GW par Royaume-Uni.)

	2006	2007
« Unités primaires » (les premiers 2 kWh/j)	10,73 pence/kWh	17,43 pence/kWh
« Unités secondaires » (le reste)	8,13 pence/kWh	9,70 pence/kWh

TABLEAU K.4. Charges domestiques d'électricité (2006, 2007) pour les clients de Powergen à Cambridge, y compris les taxes.

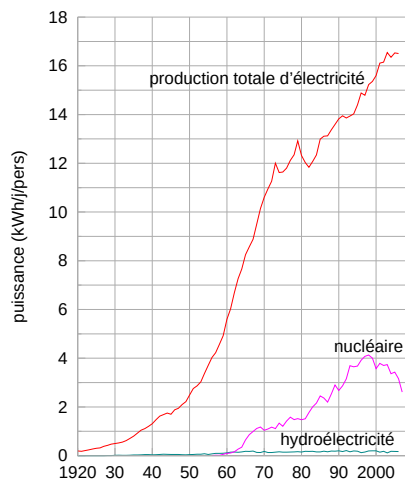


FIGURE K.5. Historique de la production totale d'électricité, d'hydroélectricité, et d'électricité nucléaire au Royaume-Uni. Les puissances sont exprimées « par personne » en divisant chaque puissance par 60 millions.

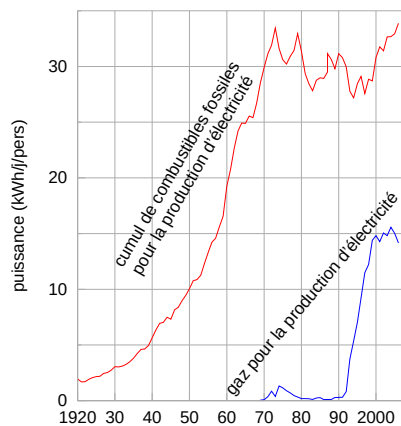


FIGURE K.6. Historique de la consommation britannique de combustibles fossiles pour la production d'électricité. Les puissances sont exprimées « par personne » en divisant chaque puissance par 60 millions.

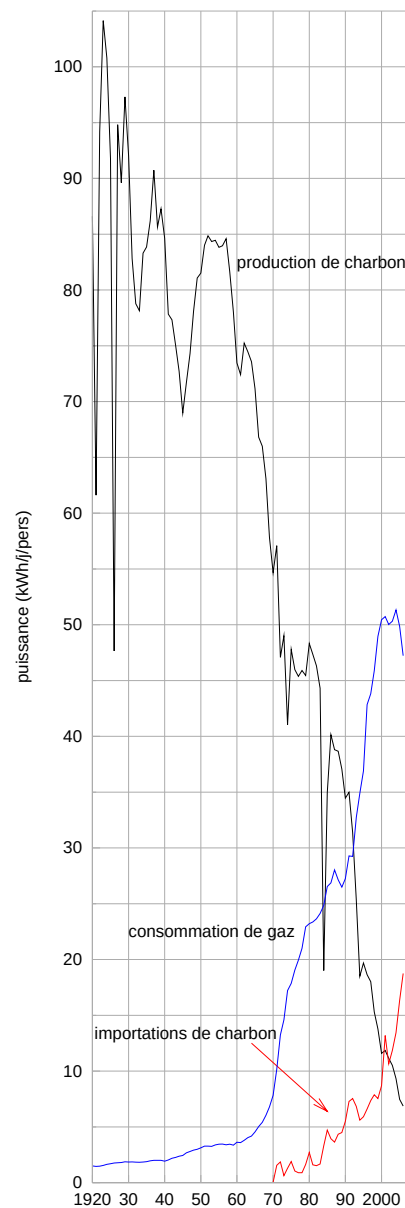


FIGURE K.7. Production et importations de charbon au Royaume-Uni ; consommation de gaz au Royaume-Uni. Les puissances sont exprimées « par personne » en divisant chaque puissance par 60 millions.

Liste de liens Web

Cette section liste l'ensemble des liens qui correspondent à chacune des mini-URL mentionnées dans le reste du livre. Chaque item commence par le numéro de la page qui mentionne la mini-URL. Voir aussi <http://tinyurl.com/yh8xse> (ou www.inference.phy.cam.ac.uk/sustainable/book/tex/cft.url.html) pour une page Web cliquable qui liste toutes les URL de ce livre.

Si vous trouvez un lien qui ne mène nulle part, vous pouvez retrouver la page avec la *Wayback Machine internet archive* [f754].

p tinyURL Liste complète des références hypertexte.

20 ydoobr www.bbc.co.uk/radio4/news/anyquestions_transcripts_20060127.shtml

20 2jhve6 www.ft.com/cms/s/0/48e334ce-f355-11db-9845-000b5df10621.html

21 25e59w news.bbc.co.uk/1/low/uk_politics/7135299.stm

21 5o7mxk www.guardian.co.uk/environment/2007/dec/10/politics

21 5c4o1c www.foe.co.uk/resource/press_releases/green_solutions_undermined_10012008.html

21 2fztd3 www.jalopnik.com/cars/alternative-energy/now-thats-some-high-quality-h2o-car-runs-on-water-177788.php

21 26e8z news.bbc.co.uk/1/hi/sci/tech/3381425.stm

21 ykhayj politics.guardian.co.uk/terrorism/story/0,,1752937,00.html

22 16y5g www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/fig3-1.htm

23 5qfkaw www.nap.edu/catalog.php?record_id=12181

23 2z2xg7 assets.panda.org/downloads/2_vs_3_degree_impacts_1oct06_1.pdf

24 yyxq2m www.bp.com/genericsection.do?categoryId=93&contentId=2014442

24 dzcq www.defra.gov.uk/environment/climatechange/internat/pdf/avoid-dangercc.pdf

24 y98ys5 news.bbc.co.uk/1/hi/business/4933190.stm

36 5647rh www.dft.gov.uk/pgr/statistics/datatablespublications/tsgb/

36 27jdc5 www.dft.gov.uk/pgr/statistics/datatablespublications/energyenvironment/tsgb-chapter3energyandtheenvi1863

36 28abpm corporate.honda.com/environmentology/

36 nm41 www.simetric.co.uk/si_liquids.htm

36 2hcgdh cta.ornl.gov/data/appendix_b.shtml

40 vxhhj www.cl.cam.ac.uk/research/dtg/weather/

40 tdvml www.phy.hw.ac.uk/resrev/aws/awsarc.htm

43 3fbufz www.ipcc.ch/ipccreports/sres/aviation/004.htm

43 3asmgy news.independent.co.uk/uk/transport/article324294.ece

43 9ehws www.boeing.com/commercial/747family/technical.html

43 3exmgv www.ryanair.com/site/EN/about.php?page=About&sec=environment

44 yrnmm www.grida.no/climate/ipcc/aviation/124.htm

44 36w5gz www.rolls-royce.com/community/downloads/environment04/products/air.html

52 2rqloc www.metoffice.gov.uk/climate/uk/location/scotland/index.html

52 2szckw www.metoffice.gov.uk/climate/uk/stationdata/cambridgedata.txt

53 5hrxls eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/sse.cgi?s01

53 6z9epq www.solarcentury.com/knowledge_base/images/solar_pv_orientation_diagram

56 2tl7t6 www.reuk.co.uk/40-Percent-Efficiency-PV-Solar-Panels.htm

56 6hobq2 www.azonano.com/news.asp?newsID=4546

56 2lsx6t www.udel.edu/PR/UDaily/2008/jul/solar072307.html

56 62ccou www.nrel.gov/news/press/2008/625.html

56 5hzs5y www.ens-newswire.com/ens/dec2007/2007-12-26-093.asp

56 39z5m5 news.bbc.co.uk/1/hi/world/europe/6505221.stm
 56 2uk8q8 www.powerlight.com/about/press2006_page.php?id=59
 56 2ahec3 www.aps.org/meetings/multimedia/upload/The_Status_and_Outlook_for_the_Photovoltaics_Industry_David_E_Carlson.pdf
 57 6kqq77 www.defra.gov.uk/erdp/pdfs/ecs/miscanthus-guide.pdf
 69 ynjzej www.aceee.org/conf/06modeling/azevado.pdf
 75 wbd8o www.ref.org.uk/energydata.php
 77 25e59w news.bbc.co.uk/1/low/uk_politics/7135299.stm
 77 2t2vj3 www.guardian.co.uk/environment/2007/dec/11/windpower.renewableenergy
 77 57984r www.businessgreen.com/business-green/news/2205496/critics-question-government
 78 6oc3ja www.independent.co.uk/environment/green-living/donnachadh-mccarthy-my-carbonfree-year-767115.html
 78 5soql2 www.housebuildersupdate.co.uk/2006/12/eco-bollocks-award-windsave-ws1000.html
 78 6g2jm5 www.carbontrust.co.uk/technology/technologyaccelerator/small-wind
 93 5h69fm www.thepoultrysite.com/articles/894/economic-approach-to-broiler-production
 94 5pwojp www.fertilizer.org/ifa/statistics/STATSIND/pkann.asp
 94 5bj8k3 www.walkerscarbonfootprint.co.uk/walkers_carbon_footprint.html
 94 3s576h www.permatopia.com/transportation.html
 102 6xrm5q www.edf.fr/html/en/decouvertes/voyage/usine/retour-usine.html
 111 yx7zm4 www.cancentral.com/funFacts.cfm
 111 r22oz www-materials.eng.cam.ac.uk/mpsite/interactive_charts/energy-cost/NS6Chart.html
 111 yhrest www.transportation.anl.gov/pdfs/TA/106.pdf
 111 y5as53 www.aluminum.org/Content/NavigationMenu/The_Industry/Government_Policy/Energy/Energy.htm
 111 y2ktgg www.ssab.com/templates/Ordinary___573.aspx
 112 6lbrab www.lindenau-shipyard.de/pages/newsb.html
 112 5ctx4k www.wilhelmsen.com/SiteCollectionDocuments/WW_Miljorapport_engelsk.pdf
 113 yqbz13 www.normanbaker.org.uk/downloads/Supermarkets_Report_Final_Version.doc
 121 yttg7p budget2007.treasury.gov.uk/page_09.htm
 121 fqcqw www.mod.uk/DefenceInternet/AboutDefence/Organisation/KeyFactsAboutDefence/DefenceSpending.htm
 121 2e4fcs press.homeoffice.gov.uk/press-releases/security-prebudget-report
 121 33x5kc www.mod.uk/NR/rdonlyres/95BBA015-22B9-43EF-B2DC-DFF14482A590/0/gep_200708.pdf
 121 35ab2c www.dasa.mod.uk/natstats/ukds/2007/c1/table103.html
 121 yg5fsj siteresources.worldbank.org/DATASTATISTICS/Resources/GDP.pdf
 121 yfgjna www.sipri.org/contents/milap/milex/mex_major_spenders.pdf/download
 122 slbae www.wisconsinproject.org/countries/israel/plut.html
 122 yh45h8 www.usec.com/v2001_02/HTML/Aboutusec_swu.asp
 122 t2948 www.world-nuclear.org/info/inf28.htm
 122 2ywzee www.globalsecurity.org/wmd/intro/u-centrifuge.htm
 133 uzek2 www.dti.gov.uk/energy/inform/dukes/
 134 3av4s9 hdr.undp.org/en/statistics/
 134 6frj55 news.independent.co.uk/environment/article2086678.ece
 153 5qhvc3 www.tramwayinfo.com/Tramframe.htm?www.tramwayinfo.com/tramways/Articles/Compair2.htm
 159 4qgg8q www.newsweek.com/id/112733/output/print
 160 5o5x5m www.cambridgeenergy.com/archive/2007-02-08/cef08feb2007kemp.pdf
 160 5o5x5m www.cambridgeenergy.com/archive/2007-02-08/cef08feb2007kemp.pdf
 160 5fbeg9 www.cfit.gov.uk/docs/2001/racomp/racomp/pdf/racomp.pdf
 160 679rpc www.tfl.gov.uk/assets/downloads/environmental-report-2007.pdf
 161 5cp27j www.eaton.com/EatonCom/ProductsServices/Hybrid/SystemsOverview/HydraulicHLA/index.htm
 162 4wm2w4 www.citroenet.org.uk/passenger-cars/psa/berlingo/berlingo-electrique.html
 163 658ode www.greencarcongress.com/2008/02/mitsubishi-moto.html
 165 czjjo corporate.honda.com/environment/fuel_cells.aspx?id=fuel_cells_fcx
 165 5a3ryx automobiles.honda.com/fcx-clarity/specifications.aspx

183 yok2nw www.eca.gov.uk/etl/find/_P_Heatpumps/detail.htm?ProductID=9868&FromTechnology=S_WaterSourcePackaged
 183 2dtx8z www.eca.gov.uk/NR/rdonlyres/6754FE19-C697-49DA-B482-DA9426611ACF/0/ETCL2007.pdf
 183 2fd8ar www.geothermalint.co.uk/commercial/hydronicheatpumpranges.html
 189 5kpjk8 blogs.reuters.com/environment/2008/09/09/a-silver-bullet-or-just-greenwash/
 189 yebuk8 www.dti.gov.uk/energy/sources/coal/index.html
 189 yhx8b www.worldenergy.org/wec-geis/publications/reports/ser/coal/coal.asp
 189 e2m9n www.coal.gov.uk/resources/cleanercoaltechnologies/ucgoverview.cfm
 205 5qntkb www.world-nuclear.org/info/reactors.htm
 206 y3wnzr npc.sarov.ru/english/digest/132004/appendix8.html
 206 32t5zt web.ift.uib.no/~lillestol/Energy_Web/EA.html
 206 2qr3yr documents.cern.ch/cgi-bin/setlink?base=generic&categ=public&id=cer-0210391
 206 ynk54y doc.cern.ch/archive/electronic/other/generic/public/cer-0210391.pdf
 206 y17tkm minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/1999/mcs99.pdf
 207 yju4a4 www.uic.com.au/nip67.htm
 207 yeyr7z taylorandfrancis.metapress.com/index/W7241163J23386MG.pdf
 207 4f2ekz www.publications.parliament.uk/pa/cm199900/cmhansrd/vo000505/text/00505w05.htm
 208 2k8y7o www.nei.org/resourcesandstats/
 208 3pvf4j www.sustainableconcrete.org.uk/main.asp?page=210
 208 4r7zpg csereport2005.bluescopesteel.com/
 208 49hcnw www.ace.mmu.ac.uk/Resources/Fact_Sheets/Key_Stage_4/Waste/pdf/02.pdf
 208 3kduo7 www.esrcsocietytoday.ac.uk/ESRCInfoCentre/facts/UK/index29.aspx?ComponentId=7104&SourcePageId=18130
 208 69vt8r www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jsp?osti_id=7200593
 208 6oby22 www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jsp?osti_id=6773271&query_id=0
 208 6312lp pubs.acs.org/cgi-bin/abstract.cgi/jacsat/2002/124/i18/abs/ja003472m.html
 208 wnchw www.feasta.org/documents/wells/contents.html?one/horelacy.html
 208 shrln www.enviros.com/vrepository/
 237 2wmuw7 news.yahoo.com/s/ap/20071231/ap_on_hi_te/solar_roads;_ylt=AuEFouXxz16nP8MRlInTJMmsONUE
 237 2hxf6c www.eirgrid.com/EirGridPortal/DesktopDefault.aspx?tabid=WindGenerationCurve&TreeLinkModID=1451&TreeLinkItemID=247
 237 2199ht www.reuters.com/article/domesticNews/idUSN2749522920080228
 238 3x2kvv www.reuters.com/article/rbssIndustryMaterialsUtilitiesNews/idUSL057816620080305
 238 5o2xgu www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web_sites/03-04/wind/content/storageavailable.html
 239 2n3pmb www.dynamicdemand.co.uk/pdf/fridge_test.pdf
 239 2k8h4o www.int.iol.co.za/index.php?art_id=vn20080201045821205C890035
 239 5cp27j www.eaton.com/EatonCom/ProductsServices/Hybrid/SystemsOverview/HydraulicHLA/index.htm
 239 2sxlyj www.batteryuniversity.com/partone-3.htm
 239 ktd7a www.vrbpower.com/docs/news/2006/20060830-PR-TapburySale-IrelandWindfarm.pdf
 239 627ced www.vrbpower.com/docs/whitepapers/SEItechpaper1.pdf
 239 5fas17 www.indexmundi.com/en/commodities/minerals/vanadium/vanadium_t7.html
 239 2wmuw7 news.yahoo.com/s/ap/20071231/ap_on_hi_te/solar_roads;_ylt=AuEFouXxz16nP8MRlInTJMmsONUE
 252 5os7dy tinyurl.com/5os7dy
 252 yrw2oo tinyurl.com/yrrw2oo
 257 6eoyhg news.bbc.co.uk/1/hi/uk/7215688.stm
 257 yu8em5 www.foe.co.uk/resource/reports/paying_for_better_transport.pdf
 257 3x2cr4 news.bbc.co.uk/1/hi/england/london/6151176.stm
 257 2dd4mz news.bbc.co.uk/1/low/uk_politics/6391075.stm
 259 7v1xp www.lse.ac.uk/collections/pressAndInformationOffice/newsAndEvents/archives/2005/IDCard_FinalReport.htm
 259 6x4nvu www.statoil.com/statoilcom/svg00990.nsf?opendatabase&artid=F5255D55E1E78319C1256FEF0044704B
 259 39g2wz www.dillinger.de/dh/referenzen/linepipe/01617/index.shtml.en
 259 3ac8sj www.hydro.com/ormenlange/en/
 259 y7kg26 [www.politics.co.uk/issue-briefs/economy/taxation/tobacco-duty/tobacco-duty-\\$366602.htm](http://www.politics.co.uk/issue-briefs/economy/taxation/tobacco-duty/tobacco-duty-$366602.htm)

259 r9fcf en.wikipedia.org/wiki/War_on_Drugs
 260 ysncks news.bbc.co.uk/1/low/uk_politics/6205174.stm
 260 2vq59t www.boston.com/news/globe/editorial_opinion/oped/articles/2007/08/01/the_63_billion_sham/
 261 ym46a9 <https://www.cia.gov/cia/publications/factbook/print/xx.html>
 261 99bpt www.guardian.co.uk/Iraq/Story/0,2763,1681119,00.html
 261 2bmuod www.guardian.co.uk/environment/2007/aug/13/renewableenergy.energy
 261 3g8nn8 image.guardian.co.uk/sys-files/Guardian/documents/2007/08/13/RenewablesTargetDocument.pdf
 261 3jo7q2 www.viewsofscotland.org/library/docs/HoL_STC_RE_Practicalities_04.pdf
 273 2ykfgw www.guardian.co.uk/environment/2007/jan/09/travelsenvironmentalimpact.greenpolitics
 273 2nsvx2 www.number-10.gov.uk/output/Page10300.asp
 273 yxq5xk commentisfree.guardian.co.uk/george_monbiot/2007/01/an_open_letter_to_the_prime_mi.html
 273 3tcpyah www.elysee.fr/president/les-actualites/discours/2007/discours-a-l-occasion-de-la-restitution-des-7949.html
 282 3doaeg web.archive.org/web/20040401165322/members.cox.net/weller43/sunshine.htm
 283 3lcw9c knol.google.com/k/-/-/15x31uzlqeo5n/1
 294 voxbz news.bbc.co.uk/1/low/business/6247371.stm
 294 yofchc news.bbc.co.uk/1/low/uk/7053903.stm
 294 3e28ed www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/118.htm
 305 2bhu35 www.lafn.org/~dave/trans/energy/rail_vs_auto_EE.html
 309 6by8x encarta.msn.com/encyclopedia_761553622/Internal-Combustion_Engine.html
 309 348whs www.cleangreencar.co.nz/page/prius-petrol-engine
 314 ydt7uk www.nrel.gov/business_opportunities/pdfs/31235sow.pdf
 314 yaonz www.windpower.org/en/tour/wres/shear.htm
 316 6o86ec www.londonarray.com/london-array-project-introduction/offshore/
 316 6bkvbn www.timesonline.co.uk/tol/news/world/asia/article687157.ece
 316 yekdaa www.windpower.org/en/stat/betzpro.htm
 316 ymfbsn www.windpower.org/en/tour/wres/powdensi.htm
 316 6eylaxj <http://eolienne.f4jr.org/rugosite>
 317 ypvbvd www.ref.org.uk/images/pdfs/UK_Wind_Phase_1_web.pdf
 317 wbd8o www.ref.org.uk/energydata.php
 326 33ptcg www.stevefossett.com/html/main_pages/records.html
 328 6r32hf www.theaustralian.news.com.au/story/0,25197,23003236-23349,00.html
 332 2af5gw www.airliners.net/info/stats.main?id=100
 332 32judd www.wildanimalsonline.com/birds/wanderingalbatross.php
 332 2qbquv news.bbc.co.uk/1/low/sci/tech/6988720.stm
 332 5h6xph www.goldcoastyachts.com/fastcat.htm
 332 4p3yco www.fas.org/man/dod-101/sys/ship/row/rus/903.htm
 339 3ap7lc www.biocap.ca/files/Ont_bioenergy_OPA_Feb23_final.pdf
 340 4hamks www.methanetomarkets.org/resources/landfills/docs/uk_lf_profile.pdf
 348 65h3cb www.dorset-technical-committee.org.uk/reports/U-values-of-elements-Sept-2006.pdf
 351 5dhups www.arct.cam.ac.uk/UCPB/Place.aspx?rid=943658&p=6&ix=8&pid=1&prcid=27&ppid=201
 377 2bqapk www.phys.murdoch.edu.au/rise/reslab/resfiles/tidal/text.html
 378 r22oz www-materials.eng.cam.ac.uk/mpsite/interactive_charts/energy-cost/NS6Chart.html
 381 3kmcks www.yourhome.gov.au/technical/index.html
 382 3kmcks www.yourhome.gov.au/technical/index.html
 392 3b7zdf www.communities.gov.uk/publications/planningandbuilding/generalizedlanduse
 395 3av4s9 hdr.undp.org/en/statistics/
 403 f754 www.archive.org/web/web.php

Références

- AITCHISON, E. (1996). Methane generation from UK landfill sites and its use as an energy resource. *Energy Conversion and Management*, 37(6/8) :1111–1116. doi : doi:10.1016/0196-8904(95)00306-1. www.ingentaconnect.com/content/els/01968904/1996/00000037/00000006/art00306.
- AMOS, W. A. (2004). Updated cost analysis of photobiological hydrogen production from *Chlamydomonas reinhardtii* green algae – milestone completion report. www.nrel.gov/docs/fy04osti/35593.pdf.
- ANDERSON, K., BOWS, A., MANDER, S., SHACKLEY, S., AGNOLUCCI, P., et EKINS, P. (2006). Decarbonising modern societies : Integrated scenarios process and workshops. Technical Report 48, Tyndall Centre. www.tyndall.ac.uk/research/theme2/final_reports/t3_24.pdf.
- ARCHER, M. D. et BARBER, J. (2004). Photosynthesis and photo-conversion. Dans M. D. Archer et J. Barber, éditeurs, *Molecular to Global Photosynthesis*. World Scientific. ISBN 978-1-86094-256-3. www.worldscibooks.com/lifesci/p218.html.
- ASHWORTH, W. et PEGG, M. (1986). *The history of the British coal industry. Vol. 5, 1946–1982 : the nationalized industry*. Clarendon, Oxford. ISBN 0198282958.
- ASPLUND, G. (2004). Sustainable energy systems with HVDC transmission. In *Power Engineering Society General Meeting*, volume 2, pages 2299–2303. IEEE. doi : 10.1109/PES.2004.1373296. www.trec-uk.org.uk/reports/HVDC_Gunnar_Asplund_ABB.pdf.
- ASSELBERGS, B., BOKHORST, J., HARMS, R., VAN HEMERT, J., VAN DER NOORT, L., TEN VELDEN, C., VERVUURT, R., WIJNEN, L., et VAN ZON, L. (2006). Size does matter – the possibilities of cultivating *Jatropha curcas* for biofuel production in Cambodia. environmental.scum.org/biofuel/jatropha/.
- BAER, P. et MASTRANDREA, M. (2006). High stakes : Designing emissions pathways to reduce the risk of dangerous climate change. www.ippr.org/publicationsandreports/.
- BAHRMAN, M. P. et JOHNSON, B. K. (2007). The ABCs of HVDC transmission technology. *IEEE Power and Energy Magazine*, 5(2).
- BAINES, J. A., NEWMAN, V. G., HANNA, I. W., DOUGLAS, T. H., CARLYLE, W. J., JONES, I. L., EATON, D. M., et ZERONIAN, G. (1983). Dinorwig pumped storage scheme. *Institution of Civil Engineers Proceedings pt. 1*, 74 :635–718.
- BAINES, J. A., NEWMAN, V. G., HANNA, I. W., DOUGLAS, T. H., CARLYLE, W. J., JONES, I. L., EATON, D. M., et ZERONIAN, G. (1986). Dinorwig pumped storage scheme. *Institution of Civil Engineers Proceedings pt. 1*, 80 :493–536.
- BAKER, C., WALBANCKE, J., et LEACH, P. (2006). Tidal lagoon power generation scheme in Swansea Bay. www.dti.gov.uk/files/file30617.pdf. A report on behalf of the Department of Trade and Industry and the Welsh Development Agency.
- BAYER CROP SCIENCE. (2003). Potential of GM winter oilseed rape to reduce the environmental impact of farming whilst improving farmer incomes. tinyurl.com/5j99df.
- BICKLEY, D. T. et RYRIE, S. C. (1982). A two-basin tidal power scheme for the Severn estuary. In *Conference on new approaches to tidal power*.
- BINDER, M., FALTENBACHER, M., KENTZLER, M., et SCHUCKERT, M. (2006). Clean urban transport for Europe. deliverable D8 final report. www.fuel-cell-bus-club.com/.
- BLACK et VEATCH. (2005). The UK tidal stream resource and tidal stream technology. report prepared for the Carbon Trust Marine Energy Challenge. www.carbontrust.co.uk/technology/technologyaccelerator/tidal_stream.htm.
- BLUNDEN, L. S. et BAHAI, A. S. (2007). Tidal energy resource assessment for tidal stream generators. *Proc. IMechE*, 221 Part A : 137–146.
- BONAN, G. B. (2002). *Ecological Climatology : Concepts and Applications*. Cambridge University Press. ISBN 9780521804769.
- BOYER, J. S. (1982). Plant productivity and environment. *Science*, 218 (4571) :443–448. doi : 10.1126/science.218.4571.443.
- BRASLOW, A. L. (1999). *A history of suction-type laminar-flow control with emphasis on flight research*. Number 13 in Monographs in Aerospace History. NASA. www.nasa.gov/centers/dryden/pdf/88792mainLaminar.pdf.
- BROECKER, W. S. et KUNZIG, R. (2008). *Fixing Climate : What Past Climate Changes Reveal About the Current Threat—and How to Counter It*. Hill and Wang. ISBN 0809045028.
- BURNHAM, A., WANG, M., et WU, Y. (2007). Development and applications of GREET 2.7 — the transportation vehicle-cycle model. www.transportation.anl.gov/software/GREET/publications.html.
- CARBON TRUST. (2007). Micro-CHP accelerator – interim report. Technical Report CTC726. www.carbontrust.co.uk/publications/publicationdetail.htm?productid=CTC726.
- CARLSSON, L. (2002). “Classical” HVDC : still continuing to evolve. *Modern Power Systems*.
- CARTWRIGHT, D. E., EDDEN, A. C., SPENCER, R., et VASSIE, J. M. (1980). The tides of the northeast Atlantic Ocean. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. Ser. A*, 298(1436) :87–139.
- CATLING, D. T. (1966). Principles and practice of train performance applied to London Transport’s Victoria line. Paper 8, Convention on Guided Land Transport (London, 27-28 October 1966).
- CHARLIER, R. H. (2003a). Sustainable co-generation from the tides : A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 7 :187–213.
- CHARLIER, R. H. (2003b). A “sleeper” awakes : tidal current power. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 7 :515–529.
- CHARNEY, J. G., ARAKAWA, A., BAKER, D. J., BOLIN, B., DICKINSON, R. E., GOODY, R. M., LEITH, C. E., STOMMEL, H. M., et WUNSCH, C. I. (1979). Carbon dioxide and climate : A scientific assessment. www.nap.edu/catalog.php?record_id=12181.
- CHISHOLM, S. W., FALKOWSKI, P. G., et CULLEN, J. J. (2001). Discrediting ocean fertilisation. *Science*, 294(5541) :309–310.

- CHITRAKAR, R., KANO, H., MIYAI, Y., et OOI, K. (2001). Recovery of lithium from seawater using manganese oxide adsorbent ($\text{H}_{1.6}\text{Mn}_{1.6}\text{O}_4$) derived from $\text{Li}_{1.6}\text{Mn}_{1.6}\text{O}_4$. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 40(9) :2054–2058. pubs.acs.org/cgi-bin/abstract.cgi/iecred/2001/40/i09/abs/ie000911h.html.
- CHURCH, R. A., HALL, A., et KANEFSKY, J. (1986). *The history of the British coal industry. Vol. 3, 1830–1913 : Victorian pre-eminence*. Clarendon, Oxford. ISBN 0198282842.
- COHEN, B. L. (1983). Breeder reactors : A renewable energy source. *American Journal of Physics*, 51(1) :75–76. sustainablenuclear.org/PADs/pad11983cohen.pdf.
- COLEY, D. (2001). Emission factors for walking and cycling. www.centres.ex.ac.uk/cee/publications/reports/91.html.
- COMMITTEE ON RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT. (2006). Managing our radioactive waste safely. www.corwm.org.uk/Pages/Current%20Publications/700%20-%20CoRWM%20July%202006%20Recommendations%20to%20Government.pdf.
- CUTE. (2006). Clean urban transport for Europe. detailed summary of achievements. www.fuel-cell-bus-club.com/.
- DAVID, J. et HERZOG, H. (2000). The cost of carbon capture. sequestration.mit.edu/pdf/David_and_Herzog.pdf. presented at the Fifth International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, Cairns, Australia, August 13 - August 16 (2000).
- DAVIDSON, E. A. et JANSSENS, I. A. (2006). Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, 440 :165–173. doi : doi:10.1038/nature04514. www.nature.com/nature/journal/v440/n7081/full/nature04514.html.
- DEFFEY, K. S. et MACGREGOR, I. D. (1980). World uranium resources. *Scientific American*, pages 66–76.
- DENHOLM, P., KULCINSKI, G. L., et HOLLOWAY, T. (2005). Emissions and energy efficiency assessment of baseload wind energy systems. *Environ Sci Technol*, 39(6) :1903–1911. ISSN 0013-936X. www.ncbi.nlm.nih.gov/entrez/query.fcgi?cmd=Retrieve&db=pubmed&dopt=Abstract&list_uids=15819254.
- DENISON, R. A. (1997). Life-cycle assessment for paper products. Dans E. Ellwood, J. Antle, G. Eyring, et P. Schulze, éditeurs, *Wood in Our Future : The Role of Life-Cycle Analysis : Proceedings of a Symposium*. National Academy Press. ISBN 0309057450. books.nap.edu/openbook.php?record_id=5734.
- DENNIS, C. (2006). Solar energy : Radiation nation. *Nature*, 443 : 23–24. doi : 10.1038/443023a.
- DEPARTMENT FOR TRANSPORT. (2007). Transport statistics Great Britain. www.dft.gov.uk/pgr/statistics/datatablespublications/tsgb/.
- DEPARTMENT OF DEFENSE. (2008). More fight – less fuel. Report of the Defense Science Board Task Force on DoD Energy Strategy.
- DEPARTMENT OF TRADE AND INDUSTRY. (2004). DTI Atlas of UK marine renewable energy resources. www.offshore-sea.org.uk/.
- DEPARTMENT OF TRADE AND INDUSTRY. (2002a). Energy consumption in the United Kingdom. www.berr.gov.uk/files/file11250.pdf.
- DEPARTMENT OF TRADE AND INDUSTRY. (2002b). Future offshore. www.berr.gov.uk/files/file22791.pdf.
- DEPARTMENT OF TRADE AND INDUSTRY. (2007). Impact of banding the renewables obligation – costs of electricity production. www.berr.gov.uk/files/file39038.pdf.
- DESSLER, A. E. et PARSON, E. A. (2006). *The Science and Politics of Global Climate Change – A Guide to the Debate*. Cambridge Univ. Press, Cambridge. ISBN 9780521539418.
- DI PRAMPERO, P. E., CORTILL, G., MOGNONI, P., et SAIBENE, F. (1979). Equation of motion of a cyclist. *J. Appl. Physiology*, 47 :201–206. jap.physiology.org/cgi/content/abstract/47/1/201.
- DIAMOND, J. (2004). *Effondrement : Comment les sociétés choisissent de leur survie ou de leur disparition*. PocketFolio.
- E4TECH. (2007). A review of the UK innovation system for low carbon road transport technologies. www.dft.gov.uk/pgr/scienceresearch/technology/lctis/e4techlcpdf.
- ECKHART, D. (1995). Nuclear fuels for low-beta fusion reactors : Lithium resources revisited. *Journal of Fusion Energy*, 14(4) :329–341. ISSN 0164-0313 (Print) 1572-9591 (Online). doi : 10.1007/BF02214511. www.springerlink.com/content/35470543rj8t2gk1/.
- EDDINGTON, R. (2006). Transport's role in sustaining the UK's productivity and competitiveness.
- EDEN, R. et BENDING, R. (1985). Gas/electricity competition in the UK. Technical Report 85/6, Cambridge Energy Research Group, Cambridge.
- ELLIOTT, D. L., WENDELL, L. L., et GOWER, G. L. (1991). An assessment of windy land area and wind energy potential in the contiguous United States. www.osti.gov/energycitations/servlets/purl/5252760-ccu0pk/.
- ENERGY FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT LTD. (2003). English partnerships sustainable energy review. www.englishpartnerships.co.uk.
- ERDINCER, A. U. et VESILIND, P. A. (1993). Energy recovery from mixed waste paper. *Waste Management & Research*, 11(6) :507–513. doi : 10.1177/0734242X9301100605.
- ETHERIDGE, D., STEELE, L., LANGENFELDS, R., FRANCEY, R., BARNOLA, J.-M., et MORGAN, V. (1998). Historical CO₂ records from the Law Dome DE08, DE08-2, and DSS ice cores. In *Trends : A Compendium of Data on Global Change*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, US Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., USA. cdiac.ornl.gov/trends/co2/lawdome.html.
- EUROPEAN COMMISSION. (2007). Concentrating solar power - from research to implementation. www.solarpaces.org/Library/library.htm.
- EVANS, D. G. (2007). Liquid transport biofuels – technology status report. www.nnfcc.co.uk/.
- EVANS, R. K. (2008). An abundance of lithium. www.worldlithium.com.
- FABER, T. E. (1995). *Fluid dynamics for physicists*. Cambridge University Press, Cambridge.
- FAIMAN, D., RAVIV, D., et ROSENSTREICH, R. (2007). Using solar energy to arrest the increasing rate of fossil-fuel consumption : The southwestern states of the USA as case studies. *Energy Policy*, 35 :567–576.

- FIES, B., PETERSON, T., et POWICKI, C. (2007). Solar photovoltaics – expanding electric generation options. mydocs.epri.com/docs/SEIG/1016279_Photovoltaic_White_Paper_1207.pdf.
- FISHER, K., WALLÉN, E., LAENEN, P. P., et COLLINS, M. (2006). Battery waste management life cycle assessment. www.defra.gov.uk/environment/waste/topics/batteries/pdf/erm-lcareport0610.pdf.
- FLATHER, R. A. (1976). A tidal model of the north-west European continental shelf. *Memoires Société Royale des Sciences de Liège*, 10 (6) :141–164.
- FLINN, M. W. et STOKER, D. (1984). *The history of the British coal industry. Vol. 2, 1700–1830 : the Industrial Revolution*. Clarendon, Oxford. ISBN 0198282834.
- FRANCIS, G., EDINGER, R., et BECKER, K. (2005). A concept for simultaneous wasteland reclamation, fuel production, and socioeconomic development in degraded areas in India : Need, potential and perspectives of *Jatropha* plantations. *Natural Resources Forum*, 29(1) :12–24. doi : 10.1111/j.1477-8947.2005.00109.x.
- FRANKLIN, J. (2007). Principles of cycle planning. www.cyclenetwork.org.uk/papers/071119principles.pdf.
- FREESTON, D. H. (1996). Direct uses of geothermal energy 1995. geoheat.oit.edu/bulletin/bull17-1/art1.pdf.
- GABRIELLI, G. et VON KÁRMÁN, T. (1950). What price speed? *Mechanical Engineering*, 72(10).
- GARRETT, C. et CUMMINS, P. (2005). The power potential of tidal currents in channels. *Proceedings of the Royal Society A*, 461(2060) : 2563–2572. dx.doi.org/10.1098/rspa.2005.1494.
- GARRETT, C. et CUMMINS, P. (2007). The efficiency of a turbine in a tidal channel. *J Fluid Mech*, 588 :243–251. journals.cambridge.org/production/action/cjoGetFulltext?fulltextid=1346064.
- GELLINGS, C. W. et PARMENTER, K. E. (2004). Energy efficiency in fertilizer production and use. Dans C. W. Gellings and K. Blok, éditeurs, *Efficient Use and Conservation of Energy*, Encyclopedia of Life Support Systems. Eolss Publishers, Oxford, UK. www.eolss.net.
- GERMAN AEROSPACE CENTER (DLR) INSTITUTE OF TECHNICAL THERMODYNAMICS SECTION SYSTEMS ANALYSIS AND TECHNOLOGY ASSESSMENT. (2006). Concentrating solar power for the Mediterranean region. www.dlr.de/tt/med-csp. Study commissioned by Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, Germany.
- GOODSTEIN, D. (2004). *Out of Gas*. W. W. Norton and Company, New York. ISBN 0393058573.
- GREEN, J. E. (2006). Civil aviation and the environment – the next frontier for the aerodynamicist. *Aeronautical Journal*, 110(1110) : 469–486.
- GRUBB, M. et NEWBERY, D. (2008). Pricing carbon for electricity generation : national and international dimensions. Dans M. Grubb, T. Jamasb, et M. G. Pollitt, éditeurs, *Delivering a Low Carbon Electricity System : Technologies, Economics and Policy*. Cambridge University Press, Cambridge.
- GUMMER, J., GOLDSMITH, Z., PECK, J., EGGAR, T., HURD, N., MIRAJ, A., NORRIS, S., NORTHCOTE, B., OLIVER, T., STRONG, D., TWITCHEN, K., et WILKIE, K. (2007). Blueprint for a green economy. www.qualityoflifechallenge.com.
- HALKEMA, J. A. (2006). Wind energy : Facts and fiction. www.countryguardian.net/halkema-windenergyfactfiction.pdf.
- HAMMOND, G. et JONES, C. (2006). Inventory of carbon & energy (ICE). www.bath.ac.uk/mech-eng/sert/embodied/. version 1.5a Beta.
- HAMMONS, T. J. (1993). Tidal power. *Proceedings of the IEEE*, 8(3) : 419–433.
- HANSEN, J., SATO, M., KHARECHA, P., RUSSELL, G., LEA, D., et SIDDALL, M. (2007). Climate change and trace gases. *Phil. Trans. Royal. Soc. A*, 365 :1925–1954. doi : 10.1098/rsta.2007.2052. pubs.giss.nasa.gov/abstracts/2007/Hansen_etal_2.html.
- HASTINGS, R. et WALL, M. (2006). *Sustainable Solar Housing : Strategies And Solutions*. Earthscan. ISBN 1844073254.
- HATCHER, J. (1993). *The History of the British Coal Industry : Towards the Age of Coal : Before 1700 Vol 1*. Clarendon Press.
- HEATON, E., VOIGT, T., et LONG, S. (2004). A quantitative review comparing the yields of two candidate C4 perennial biomass crops in relation to nitrogen, temperature, and water. *Biomass and Bioenergy*, 27 :21–30.
- HELM, D., SMALE, R., et PHILLIPS, J. (2007). Too good to be true? The UK's climate change record. www.dieterhelm.co.uk/publications/Carbon_record_2007.pdf.
- HELWEG-LARSEN, T. et BULL, J. (2007). Zero carbon Britain – an alternative energy strategy. zerocarbonbritain.com/.
- HERRING, J. (2004). Uranium and thorium resource assessment. In C. J. Cleveland, editor, *Encyclopedia of Energy*. Boston University, Boston, USA. ISBN 0-12-176480-X.
- HERZOG, H. (2003). Assessing the feasibility of capturing CO₂ from the air. web.mit.edu/coal/working_folder/pdfs/Air_Capture_Feasibility.pdf.
- HERZOG, H. (2001). What future for carbon capture and sequestration? *Environmental Science and Technology*, 35 :148A–153A. sequestration.mit.edu/.
- HIRD, V., EMERSON, C., NOBLE, E., LONGFIELD, J., WILLIAMS, V., GOETZ, D., HOSKINS, R., PAXTON, A., et DUPEE, G. (1999). Still on the road to ruin? An assessment of the debate over the unnecessary transport of food, five years on from the food miles report.
- HODGSON, P. (1999). *Nuclear Power, Energy and the Environment*. Imperial College Press.
- HOPFIELD, J. J. et GOLLUB, J. (1978). Introduction to solar energy. www.inference.phy.cam.ac.uk/sustainable/solar/HopfieldGollub78/scan.html.
- HORIE, H., TANJO, Y., MIYAMOTO, T., et KOGA, Y. (1997). Development of a lithium-ion battery pack system for EV. *JSAE Review*, 18(3) : 295–300.
- HPTCJ. (2007). Heat pumps : Long awaited way out of the global warming. www.hptcj.or.jp/about_e/contribution/index.html.
- INDERMUHLE, A., STOCKER, T., JOOS, F., FISCHER, H., SMITH, H., WAHLEN, M., DECK, B., MASTROIANNI, D., TSCHUMI, J., BLUNIER, T., MEYER, R., et STAUFFER, B. (1999). Holocene carbon-cycle dynamics based on CO₂ trapped in ice at Taylor Dome, Antarctica. *Nature*, 398 :121–126.

- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. (2001). Things that go blip in the night – standby power and how to limit it. www.iea.org/textbase/nppdf/free/2000/blipinthenight01.pdf.
- JACKSON, P. et KERSHAW, S. (1996). Reducing long term methane emissions resulting from coal mining. *Energy Conversion and Management*, 37(6-8) :801–806. doi : 10.1016/0196-8904(95)00259-6.
- JEVONS, W. S. (1866). *The Coal Question; An Inquiry concerning the Progress of the Nation, and the Probable Exhaustion of our Coal-mines*. Macmillan and Co., London, second edition. oll.libertyfund.org/.
- JONES, I. S. F. (2008). The production of additional marine protein by nitrogen nourishment. www.oceannourishment.com/files/Jc08.pdf.
- JONES, P. M. S. (1984). Statistics and nuclear energy. *The Statistician*, 33(1) :91–102. www.jstor.org/pss/2987717.
- JUDD, B., HARRISON, D. P., et JONES, I. S. F. (2008). Engineering ocean nourishment. In *World Congress on Engineering WCE 2008*, pages 1315–1319. IAENG. ISBN 978-988-98671-9-5.
- JUNIPER, T. (2007). *How Many Lightbulbs does it take To Change a Planet?* Quercus, London.
- KAMMEN, D. M. et HASSENZAH, D. M. (1999). *Should We Risk It? Exploring Environmental, Health, and Technological Problem Solving*. Princeton University Press.
- KANEKO, T., SHIMADA, M., KUJIRAOKA, S., et KOJIMA, T. (2004). Easy maintenance and environmentally-friendly train traction system. *Hitachi Review*, 53(1) :15–19. www.hitachi.com/ICSFiles/afieldfile/2004/05/25/r2004_01_103.pdf.
- KEELING, C. et WHORF, T. (2005). Atmospheric CO₂ records from sites in the SIO air sampling network. In *Trends : A Compendium of Data on Global Change*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, US Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., USA.
- KEITH, D. W., HA-DUONG, M., et STOLAROFF, J. K. (2005). Climate strategy with CO₂ capture from the air. *Climatic Change*. doi : 10.1007/s10584-005-9026-x. www.ualgary.ca/~keith/papers/51.Keith.2005.ClimateStratWithAirCapture.e.pdf.
- KING, J. (2007). The King review of low-carbon cars. Part I : the potential for CO₂ reduction. hm-treasury.gov.uk/king.
- KING, J. (2008). The King review of low-carbon cars. Part II : recommendations for action. hm-treasury.gov.uk/king.
- KOOMEY, J. G. (2007). Estimating total power consumption by servers in the US and the world. blogs.business2.com/greenwombat/files/serverpowerusecomplete-v3.pdf.
- KOWALIK, Z. (2004). Tide distribution and tapping into tidal energy. *Oceanologia*, 46(3) :291–331.
- KUEHR, R. (2003). *Computers and the Environment : Understanding and Managing their Impacts (Eco-Efficiency in Industry and Science)*. Springer. ISBN 1402016808.
- LACKNER, K. S., GRIMES, P., et ZIOCK, H.-J. (2001). Capturing carbon dioxide from air. www.net1.doe.gov/publications/proceedings/01/carbon_seq/7b1.pdf. Presented at First National Conference on Carbon Sequestration, Washington DC.
- LAWSON, B. (1996). Building materials, energy and the environment : Towards ecologically sustainable development.
- LAYZELL, D. B., STEPHEN, J., et WOOD, S. M. (2006). Exploring the potential for biomass power in Ontario. www.biocap.ca/files/Ont-bioenergy_OPA_Feb23_final.pdf.
- LE QUÉRÉ, C., RÖDENBECK, C., BUITENHUIS, E., CONWAY, T. J., LANGENFELDS, R., GOMEZ, A., LABUSCHAGNE, C., RAMONET, M., NAKAZAWA, T., METZ, N., GILLET, N., et HEIMANN, M. (2007). Saturation of the southern ocean CO₂ sink due to recent climate change. *Science*, 316 :1735–1738. doi : 10.1126/science.1136188. lgmacweb.env.uea.ac.uk/e415/publications.html.
- LEMOFOUET-GATSI, S. (2006). *Investigation and optimisation of hybrid electricity storage systems based on compressed air and supercapacitors*. PhD thesis, EPFL. library.epfl.ch/theses/?nr=3628.
- LEMOFOUET-GATSI, S. et RUFER, A. (2005). Hybrid energy systems based on compressed air and supercapacitors with maximum efficiency point tracking. leiwwww.epfl.ch/publications/lemofouet-rufer_epe_05.pdf.
- LOMBORG, B. (2001). *The skeptical environmentalist : measuring the real state of the world*. Cambridge Univ. Press, Cambridge. ISBN 0-521-80447-7.
- MABEE, W. E., SADDLER, J. N., NIELSEN, C., HENRIK, L., et STEEN JENSEN, E. (2006). Renewable-based fuels for transport. www.risoe.dk/rispubl/Energy-report5/ris-r-1557_49-52.pdf. Riso Energy Report 5.
- MACDONALD, J. M. (2008). The economic organization of US broiler production. www.ers.usda.gov/Publications/EIB38/EIB38.pdf. Economic Information Bulletin No. 38. Economic Research Service, US Dept. of Agriculture.
- MACDONALD, P., STEDMAN, A., et SYMONS, G. (1992). The UK geothermal hot dry rock R&D programme. In *Seventeenth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*.
- MACKAY, D. J. C. (2007a). Enhancing electrical supply by pumped storage in tidal lagoons. www.inference.phy.cam.ac.uk/mackay/abstracts/Lagoons.html.
- MACKAY, D. J. C. (2007b). Under-estimation of the UK tidal resource. www.inference.phy.cam.ac.uk/mackay/abstracts/TideEstimate.html.
- MACLEAY, I., HARRIS, K., et MICHAELS, C. (2007). Digest of United Kingdom energy statistics 2007. www.berr.gov.uk.
- MALANIMA, P. (2006). Energy crisis and growth 1650–1850 : the European deviation in a comparative perspective. *Journal of Global History*, 1 :101–121. doi : 10.1017/S1740022806000064.
- MARLAND, G., BODEN, T., et ANDRES, R. J. (2007). Global, regional, and national CO₂ emissions. In *Trends : A Compendium of Data on Global Change*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, US Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., USA. cdiac.ornl.gov/trends/emis/tre_glob.htm.
- MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY. (2006). The future of geothermal energy. geothermal.inel.gov/publications/future_of_geothermal_energy.pdf.
- MCBRIDE, J. P., MOORE, R. E., WITHERSPOON, J. P., et BLANCO, R. E. (1978). Radiological impact of airborne effluents of coal and nuclear plants. *Science*, 202(4372) :1045–1050. doi : 10.1126/science.202.4372.1045.

- MEADOWS, M. (1996). Estimating landfill methane emissions. *Energy Conversion and Management*, 37(6-8) :1099–1104. doi : 10.1016/0196-8904(95)00304-5.
- METZ, B., DAVIDSON, O., DE CONINCK, H., LOOS, M., et MEYER, L., éditeurs. (2005). *Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage*. Cambridge University Press, Cambridge. ISBN 978-0-521-68551-1. www.ipcc.ch/ipccreports/srrcs.htm.
- MILLS, D. R. et LIÈVRE, P. L. (2004). Competitive solar electricity. www.ausra.com/pdfs/Paper_CompetitiveSolarElectricity.pdf.
- MILLS, D. R. et MORGAN, R. G. (2008). Solar thermal electricity as the primary replacement for coal and oil in US generation and transportation. www.ausra.com/technology/reports.html.
- MILLS, D. R. et MORRISON, G. L. (2000). Compact Linear Fresnel Reflector solar thermal powerplants. *Solar Energy*, 68(3) :263–283. doi : 10.1016/S0038-092X(99)00068-7.
- MILLS, D. R., LE LIÈVRE, P., et MORRISON, G. L. (2004). First results from Compact Linear Fresnel Reflector installation. solarheatpower.veritel.com.au/MILLS_CLFR_ANZSES_FINAL.pdf.
- MINDL, P. (2003). Hybrid drive super-capacitor energy storage calculation. www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12241-B0ZEK/publikace/2003/Supcap6_EDPE.pdf.
- MOLLISON, D. (1986). Wave climate and the wave power resource. Dans D. Evans et A. de O. Falcao, éditeurs, *Hydrodynamic of Ocean Wave-Energy Utilization*, pages 133–156. Berlin. Springer. www.ma.hw.ac.uk/~denis/wave.html.
- MOLLISON, D. (1991). The UK wave power resource. In *Wave Energy (Institution of Mechanical Engineers – Seminar)*, pages 1–6. John Wiley & Sons. www.ma.hw.ac.uk/~denis/wave.html.
- MOLLISON, D., BUNEMAN, O. P., et SALTER, S. H. (1976). Wave power availability in the NE Atlantic. *Nature*, 263(5574) :223–226. www.ma.hw.ac.uk/~denis/wave.html.
- MONTEITH, J. L. (1977). Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philos. Trans. R. Soc. London*, 281 :277–294.
- NATIONAL BUREAU OF ECONOMIC RESEARCH. (2001). NBER macro-history database. www.nber.org/databases/macrophistory/contents/.
- NEFTEL, A., FRIEDLI, H., MOOR, E., LÖTSCHER, H., OESCHGER, H., SIEGENTHALER, U., et STAUFFER, B. (1994). Historical CO₂ record from the Siple station ice core. In *Trends : A Compendium of Data on Global Change*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, US Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., USA. cdiac.ornl.gov/trends/co2/siple.htm.
- NETHERLANDS ENVIRONMENTAL ASSESSMENT AGENCY. (2006). History database of the global environment. www.mnp.nl/hyde/.
- NICKOL, C. L. (2008). Silent Aircraft Initiative concept risk assessment. ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20080012497_2008011089.pdf.
- NORRSTRÖM, H. (1980). Low waste technology in pulp and paper industries. *Pure & Appl. Chem.*, 52 :1999–2004. www.iupac.org/publications/pac/1980/pdf/5208x1999.pdf.
- NUTTALL, W. J. (2004). *Nuclear Renaissance*. Institute of Physics Publishing.
- OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY. (2006). *Forty Years of Uranium Resources, Production and Demand in perspective*. OECD Publishing. ISBN 9264028064. books.google.com/books?id=HIT1o985uKYC.
- ONGENA, J. et VAN OOST, G. (2006). Energy for future centuries. Will fusion be an inexhaustible, safe and clean energy source? www.fusie-energie.nl/artikelen/ongena.pdf.
- OSWALD, J., RAINE, M., et ASHRAF-BALL, H. (2008). Will British weather provide reliable electricity? *Energy Policy*, in press. doi : 10.1016/j.enpol.2008.04.03.
- PRICE, R. et BLAISE, J. (2002). Nuclear fuel resources : Enough to last? www.ingentaconnect.com/content/oecd/16059581/2002/00000020/00000002/6802021e.
- PUTT, R. (2007). Algae as a biodiesel feedstock : A feasibility assessment. www.eere.energy.gov/afdc/pdfs/algae.pdf.
- QUAYLE, R. G. et CHANGERY, M. J. (1981). Estimates of coastal deep-water wave energy potential for the world. *Oceans*, 13 :903–907. ieeexplore.ieee.org/iel6/8271/25889/01151590.pdf.
- RICE, T. et OWEN, P. (1999). *Decommissioning the Brent Spar*. Taylor and Francis.
- RICHARDS, B. S. et WATT, M. E. (2007). Permanently dispelling a myth of photovoltaics via the adoption of a new net energy indicator. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(1) :162–172. www.sciencedirect.com/science/journal/13640321.
- RICHARDS, H. G., PARKER, R. H., GREEN, A. S. P., JONES, R. H., NICHOLLS, J. D. M., NICOL, D. A. C., RANDALL, M. M., RICHARDS, S., STEWART, R. C., et WILLIS-RICHARDS, J. (1994). The performance and characteristics of the experimental hot dry rock geothermal reservoir at Rosemanowes, Cornwall (1985–1988). *Geothermics*, 23 (2) :73–109. ISSN 0375-6505.
- RIDLEY, T. M. et CATLING, D. T. (1982). The energy implications of the design of mass transit railways. Presented at Tunnelling '82 (Third International Symposium), Brighton.
- ROGNER, H.-H. (2000). Energy resources. In *World Energy Assessment – Energy and the challenge of sustainability*, chapter 5. UNDP, New York, USA. www.undp.org/energy/activities/wea/draft-start.html.
- ROSS, A. (2008). The Loch Sloy hydro-electric scheme 1950. www.arrocharheritage.com/LochSloyHydroElectricScheme.htm.
- ROYAL COMMISSION ON ENVIRONMENTAL POLLUTION. (2004). Biomass as a renewable energy source. www.rcep.org.uk.
- ROYAL SOCIETY WORKING GROUP ON BIOFUELS. (2008). Sustainable biofuels : prospects and challenges. royalsociety.org. Policy document 01/08.
- RUBBIA, C., RUBIO, J., BUONO, S., CARMINATI, F., FIÉTIER, N., GALVEZ, J., GELÈS, C., KADI, Y., KLAPISCH, R., MANDRILLON, P., REVOL, J., et ROCHE, C. (1995). Conceptual design of a fast neutron operated high power energy amplifier. Technical Report CERN/AT/95-44 (ET), European Organization for Nuclear Research. doc.cern.ch/archive/electronic/other/generic/public/cer-0210391.pdf.
- RUDELL, A. (2003). Investigation on storage technologies for intermittent renewable energies : Evaluation and recommended r&d strategy. www.itpower.co.uk/investire/pdfs/flywheelrep.pdf.
- RYDH, C. J. et KARLSTRÖM, M. (2002). Life cycle inventory of recycling portable nickel-cadmium batteries. *Resources, Conservation and Re-*

- cycling, 34 :289–309. homepage.te.hik.se/personal/tryca/battery/abstracts.htm.
- SALTER, S. H. (2005). Possible under-estimation of the UK tidal resource. www.berr.gov.uk/files/file31313.pdf. Submission for DTI Energy Review.
- SCHELLNHUBER, H. J., CRAMER, W., NAKICENOVIC, N., WIGLEY, T., et YOHE, G. (2006). *Avoiding Dangerous Climate Change*. Cambridge University Press. www.defra.gov.uk/environment/climatechange/internat/pdf/avoid-dangercc.pdf.
- SCHIERMEIER, Q., TOLLEFSON, J., SCULLY, T., WITZE, A., et MORTON, O. (2008). Energy alternatives : Electricity without carbon. *Nature*, 454 :816–823. doi : 10.1038/454816a.
- SCHLAICH, J. et SCHIEL, W. (2001). Solar chimneys. In R. A. Meyers, editor, *Encyclopedia of Physical Science and Technology*. Academic Press, London, 3rd edition. ISBN 0-12-227410-5. www.solarmillennium.de/pdf/SolarCh.pdf.
- SCHLAICH, J., BERGERMANN, R., SCHIEL, W., et WEINREBE, G. (2005). Design of commercial solar updraft tower systems – utilization of solar induced convective flows for power generation. *Journal of Solar Energy Engineering*, 127(1) :117–124. doi : 10.1115/1.1823493. www.sbp.de/de/html/contact/download/The_Solar_Updraft.pdf.
- SCHMER, M. R., VOGEL, K. P., MITCHELL, R. B., et PERRIN, R. K. (2008). Net energy of cellulosic ethanol from switchgrass. *PNAS*, 105 (2) :464–469. doi : 10.1073/pnas.0704767105. www.pnas.org/cgi/content/full/105/2/464.
- SCHULING, R. et KRIJGSMAN, P. (2006). Enhanced weathering ; an effective and cheap tool to sequester CO₂. *Climatic Change*, 74(1-3) : 349–354.
- SCHWARTZ, S. I., editor. (1998). *Atomic Audit : Costs and Consequences of US Nuclear Weapons Since 1940*. Brookings Institution Press, Washington, D.C. www.brook.edu/fp/projects/nucwcost/schwartz.htm.
- SEKO, N., KATAKAI, A., HASEGAWA, S., TAMADA, M., KASAI, N., TAKEDA, H., SUGO, T., et SAITO, K. (2003). Aquaculture of uranium in seawater by a fabric-adsorbent submerged system. *Nuclear Technology*, 144(2) :274–278.
- SHAPOURI, H., DUFFIELD, J. A., et GRABOSKI, M. S. (1995). Estimating the net energy balance of corn ethanol. www.ethanol-gec.org/corn_eth.htm. United States Department of Agriculture Agricultural Economic Report Number 721.
- SHARMAN, H. (2005). Why wind power works for Denmark. *Proceedings of ICE Civil Engineering*, 158 :66–72. incoteco.com/upload/CIEN.158.2.66.pdf.
- SHAW, T. L. et WATSON, M. J. (2003a). The effects of pumping on the energy potential of a tidal power barrage. *Engineering Sustainability*, 156(2) :111–117. ISSN 1478-4637. doi : 10.1680/ensu.156.2.111.37018.
- SHAW, T. L. et WATSON, M. J. (2006). Flexible power generation from a Severn barrage. www.dti.gov.uk/files/file31332.pdf.
- SHAW, T. L. et WATSON, M. J. (2003b). Flexible power generation from the tides. *Engineering Sustainability*, 156(2) :119–123. ISSN 1478-4629.
- SHEPHERD, D. W. (2003). *Energy Studies*. Imperial College Press.
- SHOCKLEY, W. et QUEISSER, H. J. (1961). Detailed balance limit of efficiency of $p-n$ junction solar cells. *Journal of Applied Physics*, 32 (3) :510–519.
- SHYY, W., BERG, M., et LJUNGQVIST, D. (1999). Flapping and flexible wings for biological and micro air vehicles. *Progress in Aerospace Sciences*, 35(5) :455–505.
- SIEGENTHALER, U., MONNIN, E., KAWAMURA, K., SPAHNI, R., SCHWANDER, J., STAUFFER, B., STOCKER, T., BARNOLA, J.-M., et FISCHER, H. (2005). Supporting evidence from the EPICA Dronning Maud Land ice core for atmospheric CO₂ changes during the past millennium. *Tellus B*, 57(1) :51–57. doi : 10.1111/j.1600-0889.2005.00131.x. <ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/icecore/antarctica/maud/edml-co2-2005.xls>.
- SIMS, R., SCHOCK, R., ADEGBULULGBE, A., FENHANN, J., KONSTANTINAVICIUTE, I., MOOMAW, W., NIMIR, H., SCHLAMADINGER, B., TORRES-MARTÍNEZ, J., TURNER, C., UCHIYAMA, Y., VUORI, S., WAMUKONYA, N., et ZHANG, X. (2007). Energy supply. Dans B. Metz, O. Davidson, P. Bosch, R. Dave, et L. Meyer, éditeurs, *Climate Change 2007 : Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge. www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg3/ar4-wg3-chapter4.pdf.
- SINDEN, G. (2005). Variability of UK marine resources. Technical report, Oxford. www.carbontrust.co.uk/NR/rdonlyres/EC293061-611D-4BC8-A75C-9F84138184D3/0/variability_uk_marine_energy_resources.pdf.
- SLEATH, J. F. A. (1984). *Sea bed mechanics*. Wiley, New York. ISBN 047189091X.
- SOCOLOW, R. (2006). Stabilization wedges : An elaboration of the concept. Dans H. J. Schellnhuber, W. Cramer, N. Nakicenovic, T. Wigley, et G. Yohe, éditeurs, *Avoiding Dangerous Climate Change*. Cambridge University Press.
- STEINBERG, M. et DANG, V. (1975). Preliminary design and analysis of a process for the extraction of lithium from seawater. Technical Report 20535-R, Brookhaven National Lab., Upton, N.Y. (USA). www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jsp?osti_id=7351225. Presented at Symposium on United States lithium resources and requirements by the year 2000 ; 22 Jan 1976 ; Lakewood, CO, USA.
- STERN, N. (2007). *The Economics of Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge.
- SUBCOMMITTEE ON POULTRY NUTRITION, NATIONAL RESEARCH COUNCIL. (1994). *Nutrient Requirements of Poultry*. National Academy Press, Washington, ninth revised edition. www.nap.edu/openbook.php?isbn=0309048923.
- SUPPLE, B. (1987). *The history of the British coal industry. Vol. 4, 1913–1946 : the political economy of decline*. Clarendon, Oxford. ISBN 019828294X.
- TAYLOR, G. I. (1920). Tidal friction in the Irish Sea. *R. Soc. Lond. Ser. A*, 220 :1–33. doi : 10.1098/rsta.1920.0001.
- TAYLOR, G. K. (2002a). Are you missing the boat? the ekrano-plan in the 21st century – its possibilities and limitations. www.hypercraft-associates.com/areyoumissingtheboat2002.pdf. Presented at the 18th Fast Ferry Conference, Nice, France.

- TAYLOR, S. J. (2002b). The Severn barrage – definition study for a new appraisal of the project. www.dti.gov.uk/files/file15363.pdf. ETSU REPORT NO. T/09/00212/00/REP.
- TENNEKES, H. (1997). *The Simple Science of Flight*. MIT Press.
- THAKUR, P. C., LITTLE, H. G., et KARIS, W. G. (1996). Global coalbed methane recovery and use. *Energy Conversion and Management*, 37 (6/8) :789–794.
- THE EARTHWORKS GROUP. (1989). *50 Simple things you can do to save the earth*. The Earthworks Press, Berkeley, California. ISBN 0-929634-06-3.
- TRELOAR, G. J., LOVE, P. E. D., et CRAWFORD, R. H. (2004). Hybrid life-cycle inventory for road construction and use. *J. Constr. Engrg. and Mgmt.*, 130(1) :43–49.
- TRIEB, F. et KNIES, G. (2004). A renewable energy and development partnership EU-ME-NA for large scale solar thermal power and desalination in the Middle East and in North Africa. www.gezen.nl/wordpress/wp-content/uploads/2006/09/sanaa-paper-and-annex_15-04-2004.pdf.
- TSURUTA, T. (2005). Removal and recovery of lithium using various microorganisms. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 100(5) :562–566. www.jstage.jst.go.jp/article/jbb/100/5/100_562/_article.
- TURKENBURG, W. C. (2000). Renewable energy technologies. In *World Energy Assessment – Energy and the challenge of sustainability*, chapter 7. UNDP, New York, USA. www.undp.org/energy/activities/wea/draft-start.html.
- UCUNCU, A. (1993). Energy recovery from mixed paper waste. Technical report, NC, USA. www.p2pays.org/ref/11/10059.pdf.
- VAN DEN BERG, G. (2004). Effects of the wind profile at night on wind turbine sound. *Journal of Sound and Vibration*, 277 :955–970. www.nowap.co.uk/docs/windnoise.pdf.
- VAN VOORTHUYSEN, E. D. M. (2008). Two scenarios for a solar world economy. *Int. J. Global Environmental Issues*, 8(3) :233–247.
- VENTOUR, L. (2008). The food we waste. news.bbc.co.uk/1/shared/bsp/hi/pdfs/foodwewaste_fullreport08_05_08.pdf.
- WARWICK HRI. (2007). Direct energy use in agriculture : opportunities for reducing fossil fuel inputs. www2.warwick.ac.uk/fac/sci/whri/research/climatechange/energy/direct_energy__use_in_agriculture.pdf.
- WATER UK. (2006). Towards sustainability 2005–2006. www.water.org.uk/home/policy/reports/sustainability/indicators-2005-06/towards-sustainability-2005-2006.pdf.
- WATSON, J., HERTIN, J., RANDALL, T., et GOUGH, C. (2002). Renewable energy and combined heat and power resources in the UK. Technical report. www.tyndall.ac.uk/publications/working_papers/wp22.pdf. Working Paper 22.
- WAVEGEN. (2002). Islay Limpet project monitoring – final report. www.wavegen.co.uk/pdf/art.1707.pdf.
- WEBER, C. L. et MATTHEWS, H. S. (2008). Food-miles and the relative climate impacts of food choices in the United States. *Environ. Sci. Technol.*, 42(10) :3508–3513. doi : 10.1021/es702969f.
- WEIGHTMAN, M. (2007). Report of the investigation into the leak of dissolver product liquor at the Thermal Oxide Reprocessing Plant (THORP), Sellafield, notified to HSE on 20 April 2005. www.hse.gov.uk/nuclear/thorpreport.pdf.
- WIEDMANN, T., WOOD, R., LENZEN, M., MINX, J., GUAN, D., et BARRETT, J. (2008). Development of an embedded carbon emissions indicator — producing a time series of input-output tables and embedded carbon dioxide emissions for the UK by using a MRIO data optimisation system. randd.defra.gov.uk/Document.aspx?Document=EV02033_7331_FRP.pdf.
- WILLIAMS, D. et BAVERSTOCK, K. (2006). Chernobyl and the future : Too soon for a final diagnosis. *Nature*, 440 :993–994. doi : 10.1038/440993a.
- WILLIAMS, E. (2004). Energy intensity of computer manufacturing : hybrid assessment combining process and economic input-output methods. *Environ Sci Technol*, 38(22) :6166–6174. ISSN 0013-936X. www.ncbi.nlm.nih.gov/entrez/query.fcgi?cmd=Retrieve&db=pubmed&dopt=Abstract&list_uids=15573621.
- WILLIAMS, R. H. (2000). Advanced energy supply technologies. In *World Energy Assessment – Energy and the challenge of sustainability*, chapter 8. UNDP, New York, USA. www.undp.org/energy/activities/wea/draft-start.html.
- WILSON, E. M. et BALLS, M. (1990). Tidal power generation. In P. Novak, editor, *Developments in Hydraulic Engineering*, chapter 2. Taylor & Francis. ISBN 185166095X.
- WOOD, B. (1985). Economic district heating from existing turbines. *Institution of Civil Engineers Proceedings pt. 1*, 77 :27–48.
- YAROS, B. (1997). Life-cycle thinking for wood and paper products. Dans E. Ellwood, J. Antle, G. Eyring, and P. Schulze, éditeurs, *Wood in Our Future : The Role of Life-Cycle Analysis : Proceedings of a Symposium*.
- ZALESKI, C. P. (2005). The future of nuclear power in France, the EU and the world for the next quarter-century. www.npec-web.org/Essays/Essay050120Zalenski-FutureofNuclearPower.pdf. tinyurl.com/32louu.
- ZHU, X.-G., LONG, S. P., et ORT, D. R. (2008). What is the maximum efficiency with which photosynthesis can convert solar energy into biomass? *Current Opinion in Biotechnology*, 19 :153–159.

Index

- λ, 362
- (th), 392
- kilowatt-heure, 27
- ferme éolienne, 256
- 13 ampères, 59
- 4x4, électrique, 164

- 747, 152, 157, 318, 321, 324, 326, 332
 - record de vol, 326
- 1698, 7, 21
- 1769, 6
- 1910, 8
- 1979, 23
- 2050, 240

- A380, 157, 303
- absolution, 4
- acier, 105, 111, 381
 - énergie incorporée, 111
- acier galvanisé, 381
- Acier inoxydable, 381
- action, 240
- ACV, voir analyse de cycle de vie
- addiction, 240
- Adelman, Kenneth, 48
- aérien, 271
 - bateaux qui volent, 329
 - émissions, 18
 - futur de, 157
 - mythe sur le fait de voler moins vite, 318
- aérodynamique, 300
- aéroport d'Heathrow, 257
- aérost, 330
- affirmations d'ordre factuel, 19
- affirmations d'ordre éthique, 19
- Afrique du sud, 233
- agenda, 240
- agir concrètement, 3
- agrocarburant, 50, 91
 - betterave à sucre, 334
 - canne à sucre, 334
 - colza, 333
 - densité de puissance, 333
 - éthanol cellulosique, 334
 - jatropha, 335
 - à partir d'algues, 336
- aigle, 75
- aigle à queue blanche, 74
- aile, 319
- air
 - chaud, 60
- air ambiant, 284

- air chaud, 60
- Airbus, 157
- airbus A380, 303
- Aircar, 153
- albatros, 321, 322
- Albert Hall, 391
- alchimie, 104
- Algérie, 210, 398
- algues, 335, 336, 339
 - agrocarburant, 336
 - hydrogène, 336
- algues vertes, 336, 339
- Allemagne, 23, 39, 41
- Alpes, 247
- altitude, 64, 322
- altitude de vol, 327
- altruisme, 6
- aluminium, 105, 115, 381
 - cannette, 105
 - énergie incorporée, 111
 - Islande, 216
- Américain, 124, 277
- américain, 279
- Amérique, 110, voir aussi États-Unis
- Amérique du Nord, 277
- Amis de la Terre, 21
- Amonix, 213
- amour, 5
- amplificateur, 83
- amplificateur d'énergie, 196
- ampoule
 - basse-consommation, 68
 - incandescence, 68
- ampoule fluo-compacte, 69
- ampoule fluorescente, 69
- ampoule à LED, 69
- ampoules
 - LED, 68
- ampères, 59
- analogie, 28
- analyse de cycle de vie, 104, 155, 380
- Andasol, 210, 218
- Angleterre, voir aussi Royaume-Uni
 - précipitations, 64
- appareils électroniques, 80
- Aptera, 163
- Aquamarine Power Ltd, 364
- Arabie Saoudite, 398
- Arabie saoudite, 7, 210, 260
- arbres, 52, 57, 334
 - artificiel, 294
- arbres artificiels, 294
- Argentine, 280

- Arizona, 213, 279, 336
- armes, 260
- armée américaine, 121
- arsenal nucléaire, 260
- Artemis Intelligent Power*, 148
- Asimov, Isaac, 137
- aspirateur, 82
- aspirateur géant, 289
- aspirateur, géant, 289
- Association européenne pour l'éolien, 280
- assurance, 257
- Atlantique, 85, 363
- atmosphère, 11
- Atoms for Peace, 158
- audio, 81
- Ausra, 217
- Australie, 280, 397
- automobile, voir voiture
- autonomie
 - voiture électrique, 308
- autorité de contrôle de la publicité, 150
- autorité de démantèlement des centrales nucléaires, 197, 207
- autoroute, 257, 302
- avion, 42, 157
 - améliorer l'efficacité, 44
 - émissions, 18, 43
 - mythe sur le fait de voler moins vite, 318
 - turbopropulseur, 43
 - vitesse optimale, 322
- avions
 - bateaux comme exemples de, 329
- avions cargo, 260
- avoine, 337

- B&Q, 78
- bœuf, 90
- babiole en vrac, 104
- bactérie, 336
- Baer, Paul, 16
- baignoire, 59
- bain, 59, 60
- baisser, 183
- ballon, 330
- ballon à air chaud, 391
- Bangladesh, 397
- Barbade, 273
- barge rousse, 326
- baril de pétrole, 389
- Barrage, 64
- barrage de la Severn, 99

- barrage marémoteur, 243
- bassin, 97
- bassin de marées, 97
- bateau, voir aussi navire
 - consommation d'énergie, 109
 - croisière, 104
 - peinture, 4
 - propulsion nucléaire, 158
 - à propulsion nucléaire, 158
- bateau de croisière, 104
- bateau à grande vitesse, 154
- Bateau-Bus, 142
- bateau-bus, 143
- bateaux-avions, 329
- bathymétrie, 71
- bâtiment
 - données, 168
- battage médiatique, 173
- batterie, 163, 242
 - densité d'énergie, 309
 - densité énergétique, 235
 - lithium-sulfure, 239
 - rendement, 239
- batterie acide-plomb
 - densité énergétique, 235
 - rendement, 239
- batterie alcaline
 - densité énergétique, 235
- batterie lithium-ion
 - densité énergétique, 235
 - rendement, 239
- batterie lithium-polymère
 - densité énergétique, 235
- batterie nickel-cadmium
 - densité énergétique, 235
- batterie nickel-hydrure métallique
 - densité énergétique, 235
- batteries redox au vanadium, 236
- Bavière, 48, 56, 255
- BBC, 80, 84
- Beatrice, 70, 75, 77
- Bedford, 64
- Belgique, 23, 246
- Berlingo, 150
- béton, 381
- betterave à sucre, 334
- Betz, Albert, 312
- beurre, 34
 - valeur calorifique, 34
- biens, 104
- bifteck, 90, 93
- biocarburant
 - production, 242
 - à partir de maïs, 334
- biodiesel, 242
 - à partir d'algues, 335
- biodiesel à base de colza, 333
- bioéthanol, 242
 - sous-produits, 334
 - à partir de betterave à sucre, 334
 - à partir de maïs, 334
 - à partir de sucre de canne, 334
- bioéthanol cellulosique, 242
- biofuel, 333
- biogazole, 50
- biomasse, 45, 51
 - cogénération, 251
 - plantation, 251
 - rendements, 57
- biométhanol, 242
- Birmingham, 244
- biscottes, 50
- Blair, Tony, 252, 263, 273
- blanchisserie, 60
- blé, 337
- BMW, 34, 307
 - Hydrogen 7, 154, 165
- Boeing 747, voir 747
- bois, 52, 57, 112, 334
- bois aggloméré, 381
- bois de feu
 - densité énergétique, 235
 - valeur calorifique, 235
- bois de feuillus, 334
- bois de résineux, 334
- bois dur, 381
- bois stratifié, 381
- bois tendre, 381
- Boltzmann, 322
- Bombardier Q400, 43
- bombe, 119, 120
- bore, 21, 239, 247
- bouchon, 147
- boucle auto-amplificatrice, 288
- bouilloire, 59, 60, 232
- boule de billard, 95
- bouteille de vin, 200
- BP, 3, 31, 257
- Brinkley, Mark, 78
- brique, 381
- brise-glace, 158
- BritNed, 233
- brouillard, 12
- brouter, 91
- Brown, Gordon, 24
- BTU, 390
- bus, 152
 - électrique, 143
- bus à impériale, 3, 391
- Bush, George W., 50
- bâtiment
 - bureau économe en énergie, 351
 - consommation de chaleur, 167, 341
- déperdition, 346
- Heatkeeper, 349, 352
- inertie thermique, 358
- maison passive, 350
- maison typique, 167
- paramètre de pertes thermiques, 346
- Passivhaus, 350
- standards, 172
- université de Cambridge, 351
- bâtiments
 - réglementation, 343
- c, 392
- C5, 78, 150
- café, 390
- Caithness, 317
- calfeutrage, 168, 342
- Californie, 213
- Calorie, 89, 389
- calorie, 389
- calotte glaciaire du Groenland, 12
- Caltech, 2
- Cambridge, 52, 62, 107
- campagnes, 247
- Canada, 23, 280
- canard, Salter, 363
- canne à sucre, 57
- cannette à boire, 105
- cannette, aluminium, 105
- caoutchouc, 305, 381
- capacité, 39, 73, 315
- capacité calorifique, 59, 355
- capture du carbone, 251
- capture et séquestration du carbone, 186, 284
- car, 142
- carbone, 285
- carburant
 - valeur calorifique, 34
- carburants liquides
 - provenant de plantes, 333
- Cardiff, 100
- carnivore, 90
- carottes de glace, 7
- carré dans le désert, 279
- carré de désert, 210
- carton, 334
- catamaran, 152, 330, 332
- cellules multi-jonctions, 55
- Celsius, 341, 386
- cendres, 200
- centrale au charbon, 388
- centrale nucléaire, 388
- centrale solaire, 210
- centrale à charbon, 5
- centrale à charbon, 186

- centrale électrique, 6, 123, 388, 401
 - charbon, 388
 - fermetures, 5
- centrale électrique brûlant de la paille, 337
- centrales au fioul, 5
- centrales électriques, 30
- centrales électriques à gaz, 176
- céramique, 104
- cerceau, 311
- cerclé vicieux, 288
- certificats d'engagement pour les renouvelables, 77
- Cessna, 152, 323
- ch, 392
- chaînes Hi-Fi, 81
- chaleur, 11
 - pertes, 172
- chaleur de basse qualité, 116
- Chambre des Lords, 270
- champ de pétrole, 75
- changement climatique, 6, 11, 284
 - est un problème énergétique, 6
 - menace plus grande que le terrorisme, 5
- changement d'albedo, 288
- changement de mode de vie, 168
- chaque petit geste compte, 3, 68, 80
- charbon, 9, 111, 187, 243, 334
 - contaminations nucléaires provenant de, 198
 - contient de l'uranium et du thorium, 207
 - densité énergétique, 235
 - fermetures de centrales électriques, 401
 - Grande-Bretagne, 7, 8, 10
 - monde, 7, 8, 10
 - propre, 240, 251
 - ressource britannique, 7
 - Royaume-Uni, 187
 - valeur calorifique, 235
- charbon durable, 187
- charbon propre, 240, 251
- charbon roi, 9
- chargeur, 80, 81, 84
- chargeur de téléphone portable, 5, 80, 84
- Charles, 269
- chat, 75, 92, 123
- chaudière à condensation, 176, 180, 344
- chauffage, 240
 - au sol, 180
 - rendement, 344
 - terrasse, 61
- chauffage au sol, 180
- chauffage solaire, 46
- chauffage urbain, 173
- chauffage urbain géothermique de Southampton, 117, 118
- chauffe-eau solaire, 242, 282
- chaîne alimentaire, 92
- cheminée, 172, 186
 - solaire, 215
- cheminée solaire, 215
- cheval, 92
- chien, 92
- chiffres, 4
- Chine, 23, 377
- chips, 94
- CHP, voir cogénération de puissance
- chute de production énergétique, 401
- ciment, 381
- circulation océanique, 287
- circulation océanique mondiale, 287
- circulation thermohaline, 191, 287
- Citroën Berlingo, 150
- civilisation, 59
- Clarkson, Jeremy, 149
- climatisation, 61, 171, 175, 180
 - dans les véhicules, 156
- CO₂, voir dioxyde de carbone
- coalition de bonnes volontés, 289
- coca, 105
- cochon, 90
- coefficient de déperdition, 168
- coefficient de déperdition thermique, 343
- coefficient de performance, 175, 182, 183, 344, 353
- coefficient de pertes thermiques, 167
- coefficient de pénétration, 302
- coefficient de pénétration dans l'air, 163, 300, 301
- coefficient de transfert global, 341
- coefficient U, 341, 346
- cogénération, 172, 173, 176
 - arguments contre, 174
 - données, 178
- cogénération avec de la biomasse, 250
- coke, 111
- Colorado, 336
- colza, 333
- combustible
 - densité énergétique, 235
 - valeur calorifique, 235
- combustibles fossiles, 5, 240
 - backup de l'éolien, 221
 - consommation, 190
 - pic de, 5
- Commission pour un développement Durable, 128
- commuting
 - trajets domicile-travail, 162
- compensation, 267, 289
- compensation carbone, 4
- compensation carbone, 267, 289
- compenser, 4
- compréhension, 18
- compteur, 271, 393
- compteur de gaz, 393
- concentration de puissance solaire, 47
- condensation, 348
- conductivité, 357
- conductivité thermique, 355
- conduire, 93
- conduite
 - en ville, 302
- conduite en ville, 302
- conduite sur autoroute, 302
- confusion
 - puissance et rendement, 55
 - puissance et énergie, 28
- congélateur, 59
- conservation de l'énergie, 30
- consommation, 25
 - combustibles fossiles, 190
 - Européen, 124
- consommation de carburant, 145
- consommation de gaz, 402
- consommation de pétrole, monde, 335
- consommation mondiale de pétrole, 335
- contaminations nucléaires
 - provenant du charbon, 198
- conteneur, 391
- continent, 116
- contraction et convergence, 16
- contreplaqué, 381
- contrôle du flux laminaire, 324
- convecteur, 60
- conversion, 430
- conversion d'unité, 393
- convertir de l'énergie, 123
- CoP, 175
- Cornouailles, 107
- Coronation Street, 232
- couette, 11
- courant, 98, 99
- courant d'air, 272
- courant de marées, 243
- coût, 256
 - démantèlement des centrales nucléaires, 207
 - éolien, 77
 - éolien en mer, 77
- coûts de nettoyage du nucléaire, 207
- coûts économiques, 26
- coûts environnementaux des alternatives durables, 26
- coûts sociaux, 26
- couverture nuageuse, 45

- crête, 315
- Croesor, 238
- croissance de la population, 7
- croissance de population, 137
- croissance démographique, 7, 10
- crotte, 9
- crottes de poulet, 337
- croûte, 114
- croûte terrestre, 114
- Croydon Tramlink, 143
- Cruachan, 226
- CSC, 186, voir aussi capture et séquestration du carbone
- CSP, voir énergie solaire à concentration
- cuisine, 245
- cuisinière, 59, 60
- cuivre, 381
- cultures énergétiques, 333
- Curtis, Jamie Lee, 155
- CUTE, 154
- Cx, 163
- cycle Atkinson, 162
- cycle de vie
 - des trucs, 104
- cycle Otto, 162
- cycle à stockage direct, 192
- cycliste, 312

- Danemark, 29, 39, 41, 74, 233
- Darth Vader, 80
- DD, 203
- débit, 28
- décharge thermique sauvage, 354
- décharges d'ordures, 50
- déchets
 - nucléaire, 190, 200
 - provenant du charbon, 200
- déchets agricoles, 244
- déchets de nourriture, 57
- déchets municipaux, 334
- déchets nucléaires, 200
 - retraitement, 197
- déchets solides municipaux, 244
- déficit énergétique, 6
- définition
 - durable, 186
- degrés-jours, 343, 345
- Delaware, université du, 56
- demande
 - électricité, 220, 223, 401
 - gaz, 237
- demande dynamique, 232
- demande en température, 344
- demande nationale de gaz, 237
- démantèlement, 257
- démarrable et arrêtable à la demande, 220
- densité, 36, 311
- densité d'énergie
 - beurre, 34
- densité de population, 40, 209, 252
 - urbaine, 182
- densité de puissance, 48
 - agrocarburant, 333
 - colza, 333
 - éolien en mer, 70
 - hydroélectricité, 64, 65
 - hydroélectricité de montagne, 65
 - miscanthus, 51
 - panneaux d'eau chaude, 46
 - parc éolien, 38
 - photovoltaïque, 55
 - plantes, 52
 - rayonnement solaire, 45
 - solaire à concentration, 210, 217
 - tous les renouvelables, 133, 209
 - vent, 311
- densité énergétique, 34, 36, 334
 - batterie acide-plomb, 235
 - batterie lithium-ion, 235
 - beurre, 34
 - bois de feu, 235
 - charbon, 235
 - combustible, 235
 - diesel, 235
 - éthanol, 235
 - gazole, 235
 - hydrogène, 235
 - kérosène, 235
 - méthanol, 235
 - propane, 235
- dépenses
 - armement, 261
- déperdition, 168, 343, 346
- dernier sujet, 284
- désert, 210
- désintégration radioactive, 114
- dessalement, 108, 110, 364
- détritus, 104
- diagramme en crosse de hockey, 22
- Diamond, Jared, 209
- diazote, 322
- diesel
 - densité énergétique, 235
- Dinorwig, 226, 227, 229, 255, 387
- dioxyde de carbone, 22, 186, 187, 284
 - changement climatique, 6
 - données, 7, 10
 - effet de serre, 6
 - équivalent, 12
- dioxygène, 322
- dire non, 129
- dirigeable, 330
- distance moyenne parcourue, 36
- diversité, 245
- divertissement, 81
- Do-It-Yourself planet repairs, 84, 183
- domestique, 28
- données
 - altitude, 64
 - bathymétrie, 71
 - bois, 334
 - capacité de production électrique, 401
 - chute de production énergétique, 401
 - cogénération, 177
 - combustibles fossiles, 402
 - concentrations en CO₂, 7
 - consommation d'énergie, 126, 274, 396
 - consommation de chaleur, 168
 - consommation de gaz, 402
 - consommation de pétrole, 335
 - déchets, 244
 - demande d'électricité, 401
 - demande de gaz, 237
 - densité de population urbaine, 182
 - électricité nucléaire, 402
 - émissions des voitures, 161
 - émissions de gaz à effet de serre, 10, 15, 17, 395
 - historique, 15
 - par pays, 14
 - par région, 13
 - émissions de gaz à effet de serre, 396
 - énergie nucléaire par pays, 190
 - ensoleillement, 45, 51, 282
 - éolien
 - Cairngorm, 39
 - Cambridge, 38, 40
 - Irlande, 222
 - éolien en mer, 75
 - fermetures de centrales
 - électriques, 5
 - fluctuations de puissance du vent, 222
 - fret, 109
 - G-Wiz, 151
 - hydroélectricité, 402
 - importations, 379
 - importations de charbon, 402
 - incinération, 244
 - intensité en carbone de
 - combustibles, 394
 - intensité en carbone de la
 - production d'électricité, 394
 - Islande, 115
 - mise en décharge, 244

- pays, 397
- photovoltaïque, 47
- PNB, 126, 274, 395
- pompe à chaleur, 178
- population, 10, 397
- prix du pétrole, 5
- production d'électricité, 401, 402
- production de charbon, 7, 8, 10, 402
- production de paille, 337
- production de pétrole, 5, 7, 8, 10
- profondeur, 71
- profondeur des eaux, 71
- profondeur des mers, 71
- recyclage, 244
- résistance au roulement, 305
- stockage par pompage, 238
- superficie, 397
- trajets domicile-travail, 36, 151, 162
- valeurs calorifiques, 334
- voiture électrique, 151
- double vitrage, 168, 346
- douche, 59, 60
- Dounreay, 192
- Drax, 388
- DT, 203
- durable
 - définition, 186
- duvet, 168
- Dynamic Demand, 239
- décentralisation, 174
- e, 392
- e500, 163
- easily turn-off-and-onable, 220
- EastEnders, 232
- eau, 28, 36, 59
 - chaude, 59
 - coût de, 109
 - dessalement, 108
 - énergie incorporée, 113
 - peu profonde, 364
 - pompage, 108
- eau bouillante, 30
- eau chaude, 59
- eau de mer, 110, 191, 196, 204, 206, 208
 - extraction de l'uranium, 195, 206
- eau salée, 109
- eaux territoriales britanniques, 71
- échange de batterie, 309
- échange de quotas d'émissions, 267
- échangeur de chaleur, 349
- échangeur de chaleur à contre-courant, 349
- échelle Beaufort, 311
- échelle logarithmique, 8, 10
- éclairage public, 69
- Eco Cute, 183
- éco-bateau, 152
- éco-voiture, 141
- économie, 77, 240
 - de l'éolien, 40
- économies d'énergie
 - transport, 301
- économies d'échelle, 40
- économies d'énergie
 - transport, 148
- économiste, 2
- économistes, 249
- écoper le Titanic, 80
- Écosse, 75, 98, 227, 234, voir aussi Royaume-Uni
 - précipitations, 65
- écran, 81
- écran cathodique, 83
- écran LCD, 83
- écriture en lettres capitales, 386
- EDF, 6, 401
- EESStor, 236
- effet de serre, 11
- efficacité, 137
- Eggborough, 388
- EGS, 278
- Einstein, 326
- Eisenhower, D.D., 119, 158
- écranoplane, 331
- Elean Power Station, 339
- Electra, 328
- électricité, 59, 81, 240
 - approvisionnement, 155
 - fourniture, 241, 401
 - gestion de la demande, 232
 - hydroélectrique, 64
 - la demande varie, 221
 - offre, 59
 - déficit énergétique, 5
 - pertes, 84, 125, 134, 178
 - réseau, 234
 - secteur, 232
 - verdir, 155
- électricité solaire thermique, 217
- électrification
 - du chauffage, 242
 - du transport, 242
- élégante petitesse, 191
- Elettrica, 150
- emballage, 104
- emballages, 271
- embouteillage, 147
- émissions
 - aérien, 18
 - voyage, 18
- émissions de CO₂
 - voiture électrique, 155
- émissions de gaz à effet de serre, 6, 9, 10, 12
 - de la production d'électricité, 394
 - en brûlant des combustibles, 394
 - historique, 15
 - naturel, 9
 - par pays, 14
 - par région, 13
- énergie, 28
 - chimique, 31
 - cinétique, 32, 300, 301, 311
 - conservation, 30
 - contraste avec la puissance, 28
 - dépenses, 256
 - faible qualité, 46
 - géothermique, 114
 - géothermique, 30
 - houle, 361
 - marémotrice, 101
 - nucléaire, 2
 - solaire, 45
 - solaire à concentration, 210
 - vagues, 361
 - à vaporiser, 36
 - électrique, 31
- énergie cinétique, 361
- énergie de faible qualité, 46
- énergie durable
 - coûts environnementaux, 26
 - coûts sociaux, 26
- énergie grise, 105
- énergie incorporée, 105
 - acier, 111
 - aluminium, 111
 - bois, 381
 - bâtiments, 382
 - eau, 113
 - matériaux de construction, 381
 - métaux, 381
 - papier, 112
 - polyéthylène, 111
 - roches, 381
 - verre, 381
 - voiture, 112, 380
- énergie lunaire, 96
- énergie nécessaire à la fabrication, 380
- énergie nucléaire
 - absence de souplesse, 220
 - données par pays, 190
- énergie nucléaire, 4, 21
- énergie potentielle, 361
- énergie solaire
 - dans les véhicules, 156
- énergies renouvelables
 - produites sur place, 351
 - recherche et développement, 261

- engrais, 52, 57, 91, 92, 94
- ennemi du peuple, 5
- ensoleillement, 45, 51, 52
 - données, 282
- entropie, 30, 109
- éolien
 - arguments contre, 221
 - comparé au marémoteur, 101
 - coût, 77
 - données, 38–40, 222
 - en mer, 70, 75
 - coût, 77
 - densité de puissance, 70
 - London Array, 77
 - peu profonde, 70
 - plates-formes auto-élévatrices, 255
 - profonde, 70, 72, 77
 - Espagne, 238
 - intermittence, 221
 - Irlande, 222
 - micro-éolien, 73, 78
 - offshore
 - plates-formes auto-élévatrices, 245
 - oiseaux, 74
- éolien en mer, 75
 - données, 75
 - facteur de charge, 317
 - plate-formes auto-élévatrices, 255
- éolien en mer peu profonde, 70
- éolien en mer profonde, 70
- éolien et véhicules électriques, 231
- éolien offshore
 - plates-formes auto-élévatrices, 245
- éolienne, 40
 - sous l'eau, 97
- éolienne de Brooklyn, 312
- éoliennes en mer, 70
- éoliennes sous-marines, 97
- équateur, 45
- Espagne, 210, 216
 - éolien, 238
- essence, 36
- estimation, 312
- Estonie, 23
- estuaire de Bristol, 99
- estuaire de la Severn, 99
- estuaire de la Tamise, 70, 75, 96, 98
- États-Unis, 23, 117, 277, 280, 397, voir
 - aussi Amérique
- récoltes, 58
- éthanol, 50
 - densité énergétique, 235
 - valeur calorifique, 235
 - à partir de maïs, 334
 - à partir de sucre de canne, 334
- éthanol cellulosique, 334
- Etheridge, D. M., 22
- éthique, 12
 - pollution, 15
 - surgénérateur, 193
- étrangers, 5
- Europe, 51, 124, 129, 244, 277, 397
 - continentale, 174, 387
- Europe continentale, 172, 387
- EV1, 163
- Evans, R. Keith, 166
- EVP, 112, 391
- exemple, 273
- exportations d'armes, 260
- extraction dans les mines
 - charbon, 187
- extraction de charbon dans les mines, 187
- extraction géothermique stimulée, 116
- Exxon, 257
- fabrication, 80, 111, 155
- facteur de capacité, 39, 315, 317
- facteur de charge, 39, 40, 75, 77, 315
- Fair Isle, 234
- falaise, 12
- fatras, 271
- Fédération de Russie, 23
- fenêtre, 346
- fermes solaires, 47
- Fetish, 164
- feux de circulation, 69
- feux de voiture allumés, 67
- Ffestiniog, 226
- Fibre de verre, 381
- fibres medium, 381
- fientes de poulet, 50
- Finlande, 246, 255
- Fischer, Joschka, 209
- Florø, 367
- fluctuations, 220, 242, 249
- flux de chaleur, 115
- flux, lumière solaire, 45
- football, 232
- force de Coriolis, 96
- forme de ballon de rugby, 95
- formule
 - énergie cinétique, 35
 - vague, 361
- Formule 1, 393
- forêt, 242, 278
- Fossett, Steve, 326
- fossé énergétique, 5
- four, 60
- four à micro-ondes, 59
- foutaises, 203
- foyer, 387
- Foyers, 226
- fractale, 76
- France, 23, 147, 202, 246, 247, 250, 397
- freinage
 - récupération d'énergie, 148, 302
- freins, 300, 301
- fret, 380
 - consommation d'énergie, 109
- fret aérien
 - consommation d'énergie, 109, 324
- fret routier, 108
- friction des marées, 114
- froid, 175
- fromage, 89
- frottement
 - vagues, 364
- frottement sur le fond, 364
- Fujitsu, 175
- fusion au deutérium, 204
- fusion au lithium, 204
- g, 362
- G-Wiz, 150
 - données, 151
- gadget, 81
- Gaïa, 2
- gallon, 390
- gaspillage d'énergie, 80
- gaz, 243
 - décharge, 338
 - demande nationale, 237
 - méthane, 338
- gaz naturel
 - la demande varie, 237
- gaz issu de décharges, 338
- gaz naturel, 243, 338
 - demande nationale, 237
 - fuites, 187
- gaz à effet de serre, 6, 11
- gazoduc, 259
- gazole, 36
 - densité énergétique, 235
 - valeur calorifique, 235
- General Motors, 153, 163
- génération à double effet, 365
- génération bidirectionnelle, 365
- génie génétique, 51, 336, 339
- géoingénierie, 284
- géothermie
 - Islande, 216
 - magma, 118
 - roches chaudes fracturables, 118
 - stimulée, 116
- géothermie minière, 115
- géothermique, 114, 175, 281
- GES, voir gaz à effet de serre
- gestion de la demande, 223, 232, 233

- GIEC, 44, 200, 294
- gigawatt-heure, 29
- gigatonne, 285
- gigawatt, 29, 222
- Gizeh, 391
- Glasgow, 39, 66
- Glendoe, 66
- GlobalFlyer, 326
- GM, 153
- GM EV1, 163
- gmt, 298
- gnuplot, 298
- Goodstein, David, 2
- Google, 283
- GPL, 111
- graines, 337
- graines de céréales, 337
- la graisse est égale à 6 000 mètres par seconde, 326
- grande pyramide, 391
- Grande-Bretagne, 110, 146, voir Royaume-Uni
 - altitude, 64
 - demande d'électricité, 220, 223, 401
 - précipitations, 65
 - précipitations, 64
- Grande-Bretagne schématique, 138
 - 2008, 138, 241
- granite, 354, 355, 381
- Great Yarmouth, 317
- Greenpeace, 5, 21, 190, 248, 280, 318
- Gretar Ívarsson, 115
- grille-pain, 59
- gros porteur, voir 747
- Grubb, Michael, 267
- guerre, 119, 261
 - contre la drogue, 259
 - Irak, 261
- guerre en Irak, 261
- guerre-du-bien-contre-le-mal, 119
- guerrier du solaire, 48
- Guignol, 296
- GW, 29
- GW(c), 392
- GW(e), 392

- haine, 5
- Haishan, 377
- Hammerfest, 98
- Hansen, Jim, 293
- Hawaï, 7
- Heatkeeper, 349, 350, 352
- Heaton, Emily, 51
- hectare, 291
- hélicoptère, 152
- Heliodynamics, 47, 56
- hélium, 203, 330
- Helm, Dieter, 378
- Helston, 107
- herbe, 50
- Herne Bay, 70
- HEU, 122
- heures ensoleillées, 51
- histoire, 129
- hiver
 - pompes à chaleur, 182
- Honda, 36, 166
 - FCX Clarity, 155
 - voiture à pile à combustible, 155
- Honda Civic, 145
- Honda NSX, 145
- Horns Reef, 71, 77
- houle
 - eaux profondes, 361
 - source de, 85
- Housebuilder's Bible*, 78
- HTCC, 212, voir haute tension en courant continu
- humidité, 348
- Hummer, 153, 154
- HVDC, voir haute tension en courant continu
- hydrate de carbone, 51
- hydraulique, ordinateur, 149
- hydrocarbure, 37
- hydroélectricité, 64, 245, 280
 - Islande, 216
 - montagne, 65
- hydrogène, 154
 - avion, 327
 - coût énergétique, 165
 - densité énergétique, 235
 - et le bore, 239
 - et éolien, 231
 - production par du nucléaire, 206
 - rendement du stockage, 231
 - valeur calorifique, 235
 - à partir d'algues, 336
 - à partir de bactéries, 50
- hydroptère, 329
- HyperCar, 165

- i MiEV, 162
- idée reçue
 - panneaux solaires, 53
- IKEA, 184
- île
 - nucléaire, 206
- îles Britanniques, 97
- îles Orcades, 96, 317
- illusion
 - Limites à la croissance, 205
- importations, 378
 - charbon, 402
 - énergie, 248, 250
- importations de charbon, 402
- imprimante, 83
- imprimante laser, 81, 83
- imprécision
 - délibérée, 18
- inactiviste, 9
- inactivistes du changement climatique, 9, 284
- incertitude, 12
- incinération
 - déchets, 50
 - rendement, 51
- incinération des déchets, 29, 50, 243, 244, 251
 - rendement, 252
- incinération des déchets ménagers, 50
- Inde, 23, 196, 281
- Indermuhle, A., 22
- inertie thermique, 358
- infrarouge, 11
- inox, 381
- intendance des stocks, 260
- intensité carbone, 378
- intensité énergétique, 137
- Interconnexion
 - France–Angleterre, 212
- interconnexion
 - Norvège, 233, 245
- Interconnexion France–Angleterre, 216, 247
- interconnexion électrique
 - France–Angleterre, 216
 - Islande, 216
- intermittence, 72
- Internet, 24
- invasion nazie, 131, 134, 316
- investir, 257
- Irlande, 85, 221, 237, 238, 367
 - production éolienne, 222
- Irlande du Nord, 99
- irradiance directe normale, 212
- irrigation, 52
- Islande, 114, 115, 216, 218, 233
- Islay, 88
- isolation, 168, 242, 272, 348
- isolation des cavités murales, 347
- isolation des murs doubles, 169
- isolation du grenier, 168
- ITER, 203

- J-Power, 228
- Japon, 23, 171, 179, 205, 316, 397
 - législation sur l'efficacité énergétique, 182
 - transports publics, 144

- jardin, 175
- jatropha, 335
- Jersey, 364
- Jersey Water, 110
- JET, 235
- jet-ski, 152, 154
- Jevons, William Stanley, 22, 186, 187, 220
- Jolly Jumper, 92
- Josy, 269
- joule, 28, 386
- jour couvert, 53
- jour nuageux, 53
- journal, 112, 334, 338
- journalisme irresponsable, 9
- journalisme, mauvais, 9
- journaliste, 166
- journalistes, 80
- jumbo jet, 322, voir 747
- Jutland, 77

- Kazakhstan, 210, 398
- kcal, 89, 389
- Keeling, C. D., 22
- kelvin, 341, 386
- Kemp, Roger, 160
- Ken, 84, 183
- Kentish Flats, 70, 75, 79, 255
- kérosène, 36
 - densité énergétique, 235
 - valeur calorifique, 235
- kilowatt-heure, 28
- kilocalorie, 389
- kilomètres-nourriture, 107
- kilotonne, 120
- kilowatt, 60
- King, David, 270, 293
- Kinlochewe, 65
- Krouchtchev, 332
- kW(c), 392
- kW(e), 392

- λ , 362
- L'écologiste sceptique, 2
- lagon marémoteur, 101, 243, 250, 377
- laine de verre, 381
- laisser les lumières allumées, 80
- lait, 89
- laitière, 89, 93
- lamellé-collé, 381
- lampadaire, 69
- Langeled, 73, 259
- lave-linge, 60
- lave-vaisselle, 59, 60
- laver le linge, 272
- Lawson, Dominic, 9, 22
- Learjet, 152, 324

- lecteurs de DVD, 81
- LED, 69, 243
- Leggett, Jeremy, 271
- législation sur l'efficacité énergétique, 182
- Lego, 104
- LEU, 122
- Lexus, 150
 - publicité mensongère, 150
- Libye, 210, 397
- libéraux-démocrates, 248, 252
- lien hypertexte, vii
- lignes électriques, 247, 250
- limande, 86
- limite de Shockley–Queisser, 55
- limites de vitesse, 147
- Limites à la croissance, 205
- Limits To Growth*, 205
- LIMPET, 88
- linge, 59
- litanie, 12, 23
- lithium, 166, 204, 208
- lithium-ion, 163
- lithium-sulfure, 239
- lithium-titanate, 163
- litre, 390
- littoral, 76, 86
- Livingstone, Ken, 183
- Llyn Stwlan, 226
- lobby du pétrole, 11
- locataire, 269
- Loch Lomond, 227, 229
- Loch Sloy, 65, 229
- loi
 - limites de vitesse, 147
- lois
 - véhicules, 145
- lois de la physique
 - conservation, 30
- lois de Newton, 318
- Lomborg, Bjørn, 2
- London Array, 77
- Londres, 84, 183, 244, 257
- longueur d'onde, 361, 362
- Loremo, 163
- Lovelock, James, 2
- lumens par watt, 68, 69
- lumière solaire, 288
- Lun, 331
- Lune, 95, 96, 114
- Luxembourg, 23
- Lyon, 147

- m, 387
- magasin, 104
- magazine Nature, 153
- magma, 118

- maire de Londres, 84, 183
- maïs, 57, 337
- maison, 4, 346
- Maison passive, 350
- malfaisants, 80
- Malin Head, 367
- manchon à incandescence, 196
- manger de la viande, arguments sur, 91
- Manzanares, 216
- Maplin, 80
- maquillage, 257
- marche à pied, 93
- Marchetti, C., 206
- la marée fonctionne comme le vent, 371
- margarine, 34
- marée, 96, 280
 - explication, 95
 - génération bidirectionnelle, 365
 - ressource au Royaume-Uni, 377
 - sous forme de vagues, 365
- marée de mortes-eaux, 95
- marée de vives-eaux, 95
- marées
 - dans les océans, 96
- marémoteur
 - comparé à l'éolien, 101
- Mastrandrea, Michael, 16
- matériaux composites, 326
- Mazda, 156
- McCarthy, Donnachadh, 78
- McMahon, Richard, 84
- McNuggets, 50
- MDI, 153
- Médor, 92
- Mega City, 163
- mégatonne, 120
- mélange, 109
- membrane, 108
- mensonge, voir aussi mythe
- mer d'huile, 86
- mer d'Irlande, 367
- mer du Nord, 85, 97, 367
 - pétrole, 5
- mercure, 68, 69
- métal, 104
- metapost, 298
- méthane, 50, 245, 338
- méthanol, 247
 - densité énergétique, 235
 - valeur calorifique, 235
- mètre, 386
- mètre cube, 393
- méto, 143
- méto de Londres, 160
- mettre des pulls, 242
- mettre en majuscules, 29
- micro-cogénération, 173

- micro-génération, 316
- micro-ondes, 60
- micro-turbine, 73, 316
- migration, 327
- mil rouge, 57
- militaire, 261
 - assistance, 260
- milliard, 12, 256
- milliards
 - démantèlement des centrales nucléaires, 207
- mine, 220
- mine de charbon, 246
- mines
 - charbon, 190
 - géothermie, 115
 - uranium, 191
- mini 4x4, 164
- mini-turbine, 316
- Ministre des Finances, 4
- Minou, 92
- miroir, 47
- miroir parabolique, 210
- miscanthus, 51, 57, 242, 333
- mise en décharge, 104, 244
- mise en veille, 81
- MIT, 116, 118
- mode, 145
- Modec, 164
- modem, 80
- modem ADSL, 80
- modem WiFi, 80
- modification génétique, 57
- modifications génétiques, 52
- moindre coût, 249
- monazite, 196
- monde, 18, 126, 261, 274, 395–397
- monoxyde de carbone, 187
- montagnes
 - précipitations, 64
- montgolfière, 391
- montée du niveau des océans, 12
- Moore, Patrick, 190
- mortes-eaux, 100
- moteur, 303
 - échappement, 141, 303
- moteur à vapeur, 7
- moteur Stirling, 217
- moteur thermique, 172
- moteur à essence, 162
 - rendement, 141
- moteur à vapeur, 10
- motivations, 5
- moto, 12
- mouton, 91
- mouvement de circulation océanique
 - mondial, 191
- Moyen-Âge, 129
- Mt, 387
- Mtep, 387
- Mühlhausen, 48, 56
- mur, 346
- MW(c), 392
- MW(e), 392
- MyCar, 163
- mythe
 - compensation, 4, 267
 - échange de carbone, 267
 - hydroélectricité, 66
 - inefficacité des voitures, 142
 - les avions devraient voler moins vite, 318
 - marche à pied, 93
 - nourriture, 93
 - nouveaux avions beaucoup plus efficaces, 157
 - rythme de construction des centrales nucléaires, 202
- n'importe quelle couleur, pourvu que ce soit vert, 145
- nœud, 98
- Nanosafe, 163
- Nant-y-Moch, 64
- National Academy of Sciences, 22
- National Renewable Energy Laboratory, 336
- navette spatiale, 259, 302
- navire
 - porte-conteneurs, 108
 - propulsion nucléaire, 158
- navire commercial
 - propulsion nucléaire, 158
- navires, 10
- Neftel, A., 22
- neige, 288
- neutralisation carbone, 4, 250, 267, 289
- New Jersey, 279
- New Scientist, 4, 21
- Newbery, David, 267
- newton, 306, 386
- nez, 349
- nickel-cadmium, 106, 111
- NIMBY, 247
- nomenclature, 386
- North Hoyle, 75, 317
- Norvège, 74, 98, 162, 224, 233, 259, 367
- nourriture, 45
 - déchets, 50
 - déchets, 257
- nourriture jetée, 50, 57, 257
- nourriture pour poulets, 50
- Nouveau-Mexique, 213
- Nouvelle-Zélande, 312
- NS Savannah, 158
- nucléaire
 - fermetures de centrales électriques, 5
- nucléaire, 21, 80, 243, 249
 - arme, 119, 190
 - armes
 - essais, 260
 - capacité, 401
 - centrale, 192
 - combustible nécessaire, 195
 - rythme de construction, 202
 - coûts, 195
 - coûts, 195, 197
 - démantèlement, 257
 - démantèlement, 195
 - fermetures de centrales électriques, 401
 - production d'hydrogène, 206
 - réacteur
 - fusion, 203
 - surgénérateur, 193
 - réacteur
 - amplificateur d'énergie, 196
 - stockage direct, 192
- O'Leary, Michael, 43
- objets destinés aux pays riches, 15
- Ocean Power Delivery, 363
- océan, 95
 - extraction de l'uranium, 195
- Océan atlantique
 - marées, 96
- océan Atlantique
 - vagues, 86
- oie, 327
- oiseau, 318
 - rayon d'action, 325
 - théorie de, 318
 - vitesse, 322
 - vol en formation, 320, 327
- oiseaux et éoliennes, 74
- Okinawa, 228
- ola, 361
- olivine, 291
- Olkiluoto, 255
- onde de marée, 96, 98
- ordinateur, 80, 81, 106
 - fabrication, 111
- ordinateur portable, 83
- orge, 337
- osmose inverse, 108, 110, 231, 364
- Ouessant, 367
- Oui, Monsieur le Ministre, 271
- oxyde de thorium, 196
- oxydes d'azote, 43
- Oxygen Cargo, 164

- Oyster, 364
- ozone, 43
- p-km, 140
- paille, 114, 339, 381
- panic érigé, 57, 334, 335
- Panne sèche, 2
- panneau de particules, 381
- panneau stop, 301
- panneaux photovoltaïques, 53
- panneaux solaires
 - durant un jour nuageux, 53
- panneaux solaires thermiques, 354
- papier, 3, 105, 112, 334, 378
 - énergie incorporée, 112
- papier journal, 112
- paquebot transocéanique, 152, 157
- paramètre de pertes thermiques, 346, 348, 350
- parc
 - solaire, 246
- parc de machines à houle, 87
- parc éolien, 38
 - Whitelee, 39
- parc éolien de Whitelee, 39
- parfum, 257
- parking, 145
- parpaing, 381
- Parti conservateur britannique, 136
- parti des Verts, 248
- Parti travailliste, 21
- Pas de Calais, 367
- pas-de-ça-chez-moi, 247
- passager-kilomètre, 140
- Passivhaus, 350
- pataugeoire, 96
- pays, 18, 126, 274, 395, 396
 - développés, 59
- Pays de Galles, 64, 70, 75, 91, 226, 317
- pays pollueur, 15
- pays étrangers peu fiables, 5
- Pays-Bas, 146, 237
- peak oil, 2, 5, 22
- pédant, 76
- peinture, 381
- Pelamis, 86, 87, 246, 363
- percepteur, 4
- période, 361
- personnes sexy, 242
- pertes
 - dues au transport, 84, 125, 134
 - pertes en ligne, 178
- pertes de chaleur, 172
- pertes de transmission, 212, 213
- pertes dues au transport, 124, 134
- pertes dues à la conversion, 124
- pertes électriques en ligne, 84, 125, 134, 178
- pertes en ligne, 178
- pesanteur, 362
- pétagramme, 387
- petit carré, 279
- petite cuillère, 81
- pétrole, 243
 - mer du Nord, 5
 - monde, 10
 - prix, 5
- pétrole brut, 243
 - production, 5
- pétrole saoudien, 10
- peuplier, 242, 333
- Pg, 387
- Phoenix SUT, 164
- photosynthèse, 51, 336
 - rendement, 57
- photovoltaïque, 45, 46
 - centrale solaire la plus puissante au monde, 56
 - total mondial, 48, 56
- photovoltaïque à concentration, 213
- physicien, 2
- physique, 35
 - conservation de l'énergie, 30
 - lois de Newton, 318
- pic nucléaire, 2
- pic pétrolier, 2, 5, 22
- pile, 25, 106
 - nickel-cadmium, 106
 - rechargeable, 111
- pile AA, 106
- pile rechargeable, 106
- pile à combustible
 - autobus, 154
 - charbon direct, 187
- pile à combustible à charbon direct, 187
- pilote, 327
- pinte, 390
- pipi, 108
- piscine, 391
- pistes cyclables, 146, 147
- piston, 51
- Placoplatre, 381
- plage, 361
- plaines
 - précipitations, 64
- plan, 193, 240, 254
- plan D, 245
- plan E, 249
- plan L, 248
- plan M, 253, 255
- plan P, 247
- plan V, 248
- planète
 - destruction, 80
- plantes
 - C3, 57
 - C4, 57
 - plus efficaces, 58
- plantes en C3, 57
- plantes en C4, 57
- plastique, 104, 381
- plate-forme auto-élevatrice, 74, 78, 245, 255
- plate-forme Magnus, 73
- plate-forme pétrolière, 70, 75
- plateau continental, 96, 288
- plâtre, 381
- plutonium, 120, 122
- PNB, 126, 274, 395
- pneu, 305
- poids, 306
- poisson, 163
- police de Jersey, 164
- politique, 240
- pollution, 69
- pollution au méthane, 187
- polyéthylène
 - énergie incorporée, 111
- pomme, 306
- pompe à chaleur, 61, 174, 353
 - air-air, 175, 180
 - géothermique, 175, 181
 - hiver, 182
- pompe à chaleur air-air, 61, 175, 242, 251
- pompe à chaleur air-eau, 180
- pompe à chaleur géothermique, 175, 181, 242
- pompe à essence, 393
- pompes à chaleur, 30
- porc, 90
- Porritt, Jonathon, 2
- porte, 346
- porte-conteneurs, 108
- portée, 141
- pot d'échappement, 141, 303
- poule pondeuse, 90
- poulet, 90, 91
- poussée, 322, 323
- Powergen, 401
- ppm, 294
- Prestatyn, 75
- prise électrique, 59
- Prius, 149, 162
- prix du carbone, 249
- production combinée de chaleur et d'électricité, 172
- production d'acier, 72
- production d'électricité au Royaume-Uni, 401

- production d'électricité, 402
- production d'électricité britannique, 402
- production de charbon, 7, 402
 - monde, 7
- production hydroélectrique, 402
- produit chimique international, 105
- profondeur des eaux, 71
- profondeur des mers, 71
- projecteur, 83
- propane
 - densité énergétique, 235
 - valeur calorifique, 235
- propriétaire, 269
- prospectus, 5
- précipitations, 64
- présentation trompeuse, 202
- présentation, tromper, 4
- Président Dwight D. Eisenhower, 119, 158
- PS10, 218
- public négatif, 296
- publicité, 84, 183
- publicité mensongère, 150
- puissance, 28
 - confusion avec le rendement, 55
 - du rayonnement solaire, 45
 - définition, 28
- puissance consommée
 - en veille, 184
- puissance consommée en veille, 184
- puissance consommée par les vampires, 184
- puissance de l'eau, 64
- puissance des marées, 96
- puissance en crête, 73
- puissance géothermique, 114
- puissance importée, 243
- puissance marémotrice
 - deux bassins, 376
- puissance par unité de longueur
 - marée, 98, 366
 - vagues, 86
- puissance par unité de surface, voir
 - densité de puissance
- puissance réactive du chargeur, 84
- puissance solaire mondiale, 48, 56
- pull-over, 168
- PVC, 381, voir photovoltaïque à
 - concentration
- pyramide, 391
- Qatar, 23
- QE2, 152
- quad, 390
- quart, 390
- quartz, 355
- Queen's University de Belfast, 364
- quotas d'émissions, 256
- quotidien, 111
- radiateur, 60, 141, 303
 - électrique, 60
- radiateur électrique, 61
- radio, 83
- radio-réveil, 83
- radiocassette, 83
- rail, 142, 305–307
 - consommation d'énergie, 109
 - fret, 109
- rail souterrain, 143
- Rance, 99, 100
- ranch, 50
- Range Rover, 152
- Rapley, Chris, 137
- rapport portance sur traînée, 323, 327
- rapport Stern, 261, 273
- ratio énergétique, 49
 - photovoltaïque, 49
 - vent, 49
- rationnement, 145
- rationner le carburant, 145
- Rau, Nick, 21
- RAV4, 164
- rayon d'action
 - d'un oiseau, 325
- réacteur, 197
 - surgénérateur, 192, 193
- réacteur à neutrons rapides, 192, 194
- réacteur de fusion, 203
- réacteur nucléaire
 - surgénérateur, 193
- recharge, 309
- recharge de batteries, 234
- recharge, véhicule électrique, 234
- réchauffement climatique, 11
- recherche et développement, 261
- récoltes énergétiques, 50
- record de vol, 326
- recupération d'énergie au freinage, 148, 302
- recyclage, 104, 244
 - données, 244
- réduction de la population, 5
- réduction de population, 137
- réflecteur linéaire compact de Fresnel, 217
- réfrigérateur, 59
- réfrigérateur, 174, 175
 - fabrication, 111
- réfrigérateur-congélateur, 59, 81
- réfrigérateurs
 - et gestion de la demande, 232
- réfrigération, 30
- règlementation
 - véhicules, 145
- religion, 232
- rencontres télévisuelles, 232
- rendement, 57, 226, 238
 - avions plus efficaces, 44
 - confusion avec la puissance, 55
 - des panneaux solaires, 55
 - des plantes, 58
 - incinération, 51
 - marge d'amélioration, 26
 - progrès, 49
- rendements de plantes, 57, 333
- renouvelables, intermittence, 220
- renouvellement d'air, 341, 342
- répondeur téléphonique, 83
- représentation schématique du vol
 - aérien, 321
- République Tchèque, 23
- réseau
 - pertes, 84, 125, 134, 178
- réseau électrique
 - pertes, 84, 125, 134, 178
- réseau national
 - pertes dues au transport, 84, 125, 134
 - pertes en ligne, 178
- résistance au roulement, 305
- résistance à l'air, 141
- retraitement des déchets nucléaires, 197, 200
- rétroaction positive, 288
- REVA, 150
- Révolution industrielle, 6
- révolution industrielle, 10
- revue Nature, 165
- Rijndam, 157
- River Deben, 96
- rivière, 173
 - uranium, 194
- ROC, voir certificat d'obligation de
 - production renouvelable
- roches chaudes fracturables, 118
- roches chaudes fracturées, 116
- Rocky Mountain Institute, 165
- Rolls Royce, 44
- rond-point, 146
- Rosemanowes, 117
- rotor, 315
- roue à aubes, 66
- Royal Albert Hall, 391
- Royaume-Uni, 18, 23
 - consommation de combustibles
 - fossiles, 190
- Rubbia, Carlo, 196
- Russie, 158, 281
- Ryanair, 43

- rythme de pertes de chaleur par convection, 342
- s’y mettre vraiment, 296
- sachet de chips, 94
- Sahara, 210
- Salter, Stephen, 160
 - canard, 363
- San Francisco, 143
- Sandia National Laboratories, 118
- saucisse, 319–321
- saule, 242, 333
- saumons de fonte, 10
- Sauven, John, 21
- Savannah, 158
- SAX-40, 44
- sceptique, 6, 9
- Schwarzenegger, Arnold, 154
- schéma, 240
 - éolien, 311
 - éolienne, 312
 - train, 307
 - voiture, 300
 - vol, 319
 - vélo, 306
- Scroby Sands, 317
- sèche-cheveux, 104
- sèche-linge, 60, 272
- seconde, 386
- sécurité, 145
- sécurité d’approvisionnement en énergie
 - éolien, 221
- sécurité de notre approvisionnement énergétique, 5
- sécurité des approvisionnements, 132
- sécurité routière, 145
- SELCHP, 255, 338
- sels
 - stockage de chaleur, 210
- sels fondus, 210
 - stockage d’énergie, 210
- séquestration, 186, 284
- séquestration du carbone, 186, 284
 - cogénération, 251
 - par cogénération avec de la biomasse, 250
- serpent de mer, 363
- Séville, 218
- Shell, 77, 257
- Shell UK, 70
- Shetlands, 317
- SI, 386
- Sibérie, 288
- Siegenthaler, Urs, 22
- « Silent Aircraft », 44
- silicate de magnésium, 291
- simplification, 18
- Sinclair C5, 78, 150
- Sizewell, 197
- small is beautiful*, 191
- Smart, 162
- Smith, James, 70
- Smola, 74
- Snowdonia, 226, 228
- solaire
 - concentration
 - miroir parabolique, 210
 - parc, 246
- solaire photovoltaïque, 46
- solaire thermique, 282
- solaire à concentration, 217
 - miroir parabolique, 210
- Solar Tres, 218
- Solarcentury, 271
- Solarpark, 48, 56, 255
- soleil, 45, 114
- Solúcar, 218, 255
- sorgho, 57
- Soudan, 210, 398
- source d’énergie provisoire, 115
- sous-marin, 331
- Southampton, 117
- stade, 361
- station de remplissage
 - rôle dans le transport électrique, 309
- STE, 217
- Stiglitz, Joseph, 261
- stockage
 - sels fondus, 210
- stockage d’énergie cinétique, 234
- stockage d’énergie par pompage, 101
- stockage par pompage, 224, 226, 228, 249
 - rendement, 226, 238
- Strangford Lough, 99
- Strathclyde University, 238
- substitut au charbon, 50
- substituts au pétrole, 50
- subvention, 259
- sucreries, 107
- sujet magique, 4
- superficie, 64, 391
- superficie par habitant, 397–400
- surface
 - frontale, 142
- surface frontale, 142, 300
- surface par personne, 38
- surgénérateur, 192, 194
- surgénération, 192
- Suède, 224, 233, 246
- SWU, 122
- système géothermique stimulé, 278
- t-km, 140
- table de conversion, vitesse, 311
- tache, 214, 261
- taillis à rotation courte, 57
- tasse, 390
- tasse de thé, 390
- taux de conversion, 31
- taux de variation, 222
- taxe, 259
- taxe anti-embouteillage, 160
- taxe carbone, 389
- taxes de roulage, 145
- taxes sur les véhicules neufs, 145
- Team Crocodile, 141
- technologie, 137
- téléphone, 80
- téléphone sans fil, 81
- télévision, 80, 123
- temps calme, 220
- température, 59
- tep, 387, 392
- terrain de jeu magique, 202
- terrasse chauffée, 61
- Terre, 11, 95
 - superficie, 391
- terre, 381
- terre cuite, 381
- Tesco, 257
- Tesla Roadster, 151
- Texas, 213, 221, 237
- The Guardian*, 256
- The Independent*, 22
- The Independent*, 9, 78
- thermique, solaire, 45
- thermostat, 4, 168, 183, 271
- Think, 162
- thorium, 196
 - dans le charbon, 207
 - ressources, 196
 - réserves, 196
- thé, 390
- tinyURL, 403
- titanate de baryum, 236
- Titanic, 80, 81
- TNT, 120
- toit ouvrant, 156
- tonne, 390
- tonne-kilomètre, 140
- toujours là, 114
- tour de refroidissement, 172
- tour solaire à aspiration d’air, 215
- tour à aspiration d’air
 - solaire, 215
- tourbillon, 319
- tourbillons, 301
- tourbillons de l’air, 302
- Toyota Prius, 162

- Toyota RAV4 EV, 164
- tracteur, 141
- tracteur urbain, 141
- trafic congestionné, 147
- train, 140, 142, 152, 305–307
 - fret, 109
- train à grande vitesse, 143
- trains Virgin, 389
- trainée, 302
- trajets domicile–travail
 - données, 36, 151
- tramway, 144
- transformateur, 82
- transport, 240, 300
 - efficacité
 - scooter électrique, 165
 - mesures d’efficacité, 141
 - rendement, 93
 - avion, 43, 323
 - catamaran, 332
 - éco-voiture, 141
 - fret, 109
 - train, 142, 160
 - vélo, 141, 142
 - voiture électrique, 151
 - vélo, 160, 306
- transport aérien, 250, 271
 - futur du, 250
 - neutralisation, 250
- transport d’électricité longue distance, 134
- transport de fret, 158
- transport maritime, 108, 112, 158
- transports publics
 - Japon, 144
- transports publics, 147, 242, 271
- TREV, 164
- Trident, 260
- triple vitrage, 168
- trolleybus, 143
- Truc assez moche, 12
- trucs, 80, 104
- très gros porteur, 157
- Tsukuba, 316
- tsunami, 98, 365
- tube d’air, 301
- turbine, 173, 315
- turbopropulseur, 43, 152
- Two-Seater Renewable Energy Vehicle, 164
- UFE, 122
- UHE, 122
- Union européenne, 259
- unité de travail de séparation, 122
- unité en toutes lettres, 386
- unités, 27, 387
- conversion, 430
- vitesse, 311
- université de Cambridge, 351
- Université d’Australie du sud, 164
- unplug, 84
- UQM, 122
- uranium, 120, 122, 196, 243
 - coût, 195
 - dans le charbon, 207
 - extraction de l’eau de mer, 195
 - extraction à partir d’eau de mer, 206
 - réserves, 2
 - réserves, 191
- uranium appauvri, 193
- uranium de qualité militaire, 122
- uranium faiblement enrichi, 122
- uranium hautement enrichi, 122
- URL, voir adresse Web
- usine, 104
- USS Akron, 330
- UTS, 122, 205
- vache, 89, 90, 93
- Vader, Darth, 80
- vague, 361, 362
 - mexicaine, 361
- vagues, 85, 361
 - eau peu profonde, 366
 - eaux profondes, 361
 - marées sous forme de vagues, 365
 - production par des bateaux, 109
 - source de, 85
- vaisseau spatial, 34
- vaisselle, 59
- Valentia, 367
- valeur calorifique, 34, 36, 252, 334
 - beurre, 34
 - bois, 334
 - bois de feu, 235
 - brut, 36
 - carburant, 34
 - charbon, 235
 - combustible, 235
 - diesel, 235
 - déchets, 338
 - éthanol, 235
 - gazole, 235
 - hydrogène, 235
 - kérosène, 235
 - méthanol, 235
 - net, 36
 - propane, 235
- valeur calorifique brute, 36
- valeur calorifique nette, 57
- Vancouver, 142, 143
- vapeur d’eau, 43, 85
- variations de demande d’énergie, 237
- variations de demande de puissance, 221
- Vectrix, 164
- végétarien, 5, 90, 271
- végétarisme, 91
- véhicule
 - électrique, 150
 - poids, 145
 - surface frontale, 145
- véhicule à trois roues, 164
- véhicule électrique, 234, 245
 - coût des batteries, 155
 - dans les pays chauds, 156
 - dans les pays froids, 156
 - durée de vie, 156
 - RAV4, 164
- véhicule utilitaire, électrique, 164
- véhicules à hydrogène, 231
- véhicules électriques et éolien, 231
- vélo, 141, 142, 145, 152, 303, 305, 312
- vent, 38, 249, 280, 361
 - données, 313
 - en mer
 - plate-forme auto-élévatrice, 74
 - origine du, 85
- vent en mer, 70
- ventilation, 341, 342, 349
- Venturi Fetish, 164
- verdir l’approvisionnement en électricité, 155
- vérité, 80
- verre, 104, 381
- Vestas, 75
- viande, 90
- vidéo, 81
- viessé du vent
 - Cambridge, 38
- Virgin, 326
- Viridian Solar, 46
- viscosité, 363
- vitesse, 311, 361
- vitesse de la marée, 96
- vitesse du vent
 - Cairngorm, 39
 - Cambridge, 40
 - données, 313
- vitesse moyenne quotidienne, 38
- vitrage, 346
- vitrage, double, 168
- vives-eaux, 100
- VLS-PV, voir photovoltaïque à très grande échelle
- voiture, 34, 140, 300
 - club automobile, 271
 - covoiturage, 271
 - éco-voiture, 141

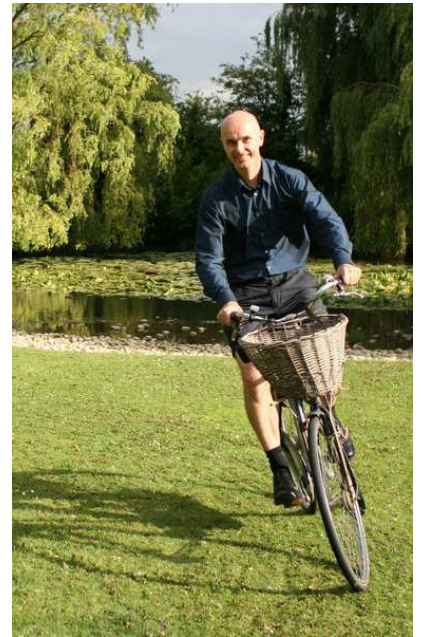
- électrique, 150, 271
- énergie incorporée, 112
- fabrication, 111
- feux, 67
- hybride, 149
- Lightning, 163
- poisson, 163
- radiateur, 303
- recharge, 309
- rendement du moteur, 303
- style de conduite, 271
- voiture électrique
 - autonomie, 308
 - modèle, 308
- voiture électrique, 152
 - émissions de CO₂, 155
- voiture à hydrogène, 152, 154, 166
- voiture électrique
 - autonomie, 308
 - comme générateur, 234
 - données, 151
 - injection de puissance dans le réseau, 234
- modèle, 308
- recharge, 309
- voitures hybrides
 - publicité mensongère, 150
- voitures en moins sur les routes, 389
- voitures hybrides, 149
 - comparaison, 150
- vol
 - formation, 320
- vol en formation, 320, 327
- volant d'inertie, 234
- Volkswagen, 302
- volt, 59
- volume, 28, 390, 391
 - unités, 390
- voyage
 - émissions, 18
 - moyen, 36
- voyage en avion, 271
- vulgarisation de la physique, 37
- W(c), 392
- W(e), 392
- Wartsila–Sulzer, 309
- watt, 80, 386
- Watt, James, 7, 10, 386
- wattmètre, 80
- Wavegen, 88
- Weier, Sven, 84
- Wellington, 312
- Wembley, 391
- WGU, 122
- White, David J., 70
- Whitstable, 70
- Whorf, T. P., 22
- Wicks, Malcolm H., 132
- Windermere, 227
- Windsave WS1000, 78
- Woodbridge, 96
- Xebra, 163
- Yamal, 158
- Ze-0, 163
- zeppelin, 330

L'énergie durable — Pas que du vent !

David JC MacKay

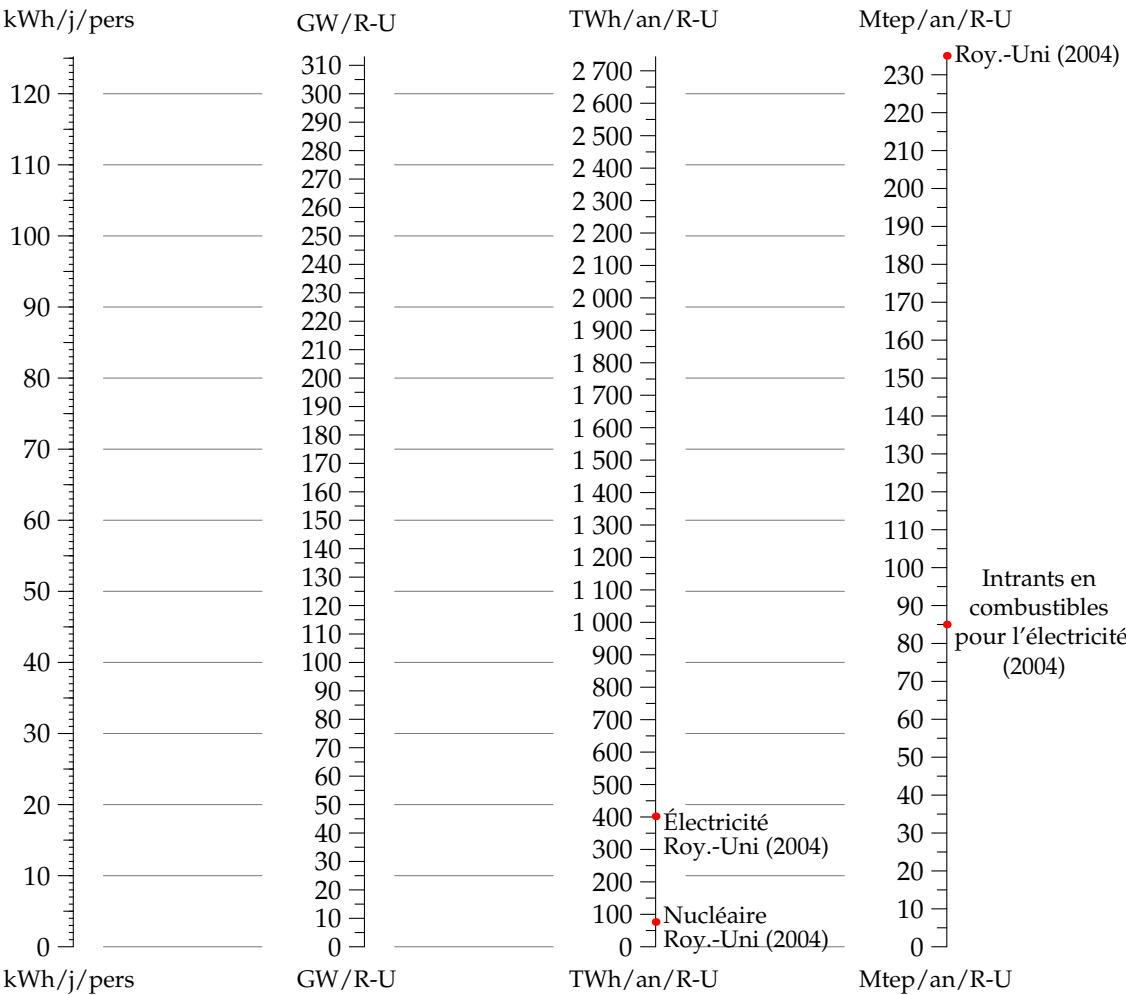
A propos de l'auteur

David MacKay (*prononcer [mac-kai]*) est Professeur d'Université dans le Département de Physique de l'université de Cambridge. Il a étudié les Sciences de la Nature à Cambridge et a obtenu son doctorat (PhD) en Systèmes neuronaux et de calcul au célèbre Institut de Technologie de Californie (Caltech). Il est revenu à Cambridge en tant que chercheur associé de la Royal Society au Darwin College. Il est internationalement connu pour ses recherches sur l'apprentissage des machines, sur les théories de l'information et sur les systèmes de communication. Il est aussi connu pour avoir inventé Dasher, une interface logicielle qui rend possible une communication efficace dans n'importe quelle langue avec n'importe quel muscle. Il enseigne la physique à Cambridge depuis 1995. Depuis 2005, il dédie l'essentiel de son temps à faire de l'enseignement au sujet de l'énergie, à destination du grand public. Il est membre du Groupe de réflexion sur l'évolution du climat (*Global Agenda Council on Climate Change*) au sein du Forum Économique Mondial.



L'auteur, en juillet 2008.
Photo de David Stern.

Table de conversion des puissances



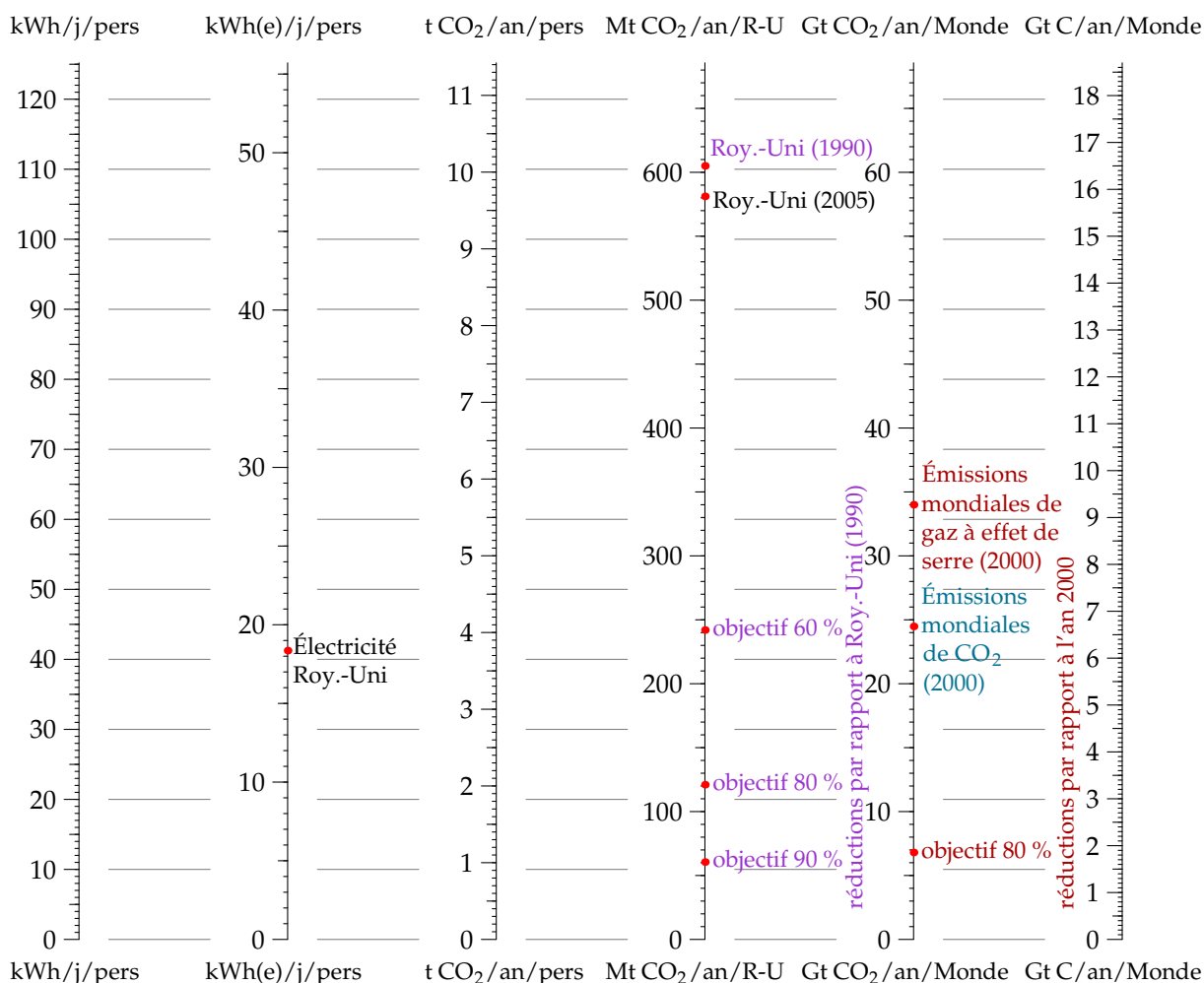
1 kWh/j identique à 1/24 kW
 GW souvent utilisé pour la « **capacité** » (production en crête)
 TWh/an souvent utilisé pour la production moyenne
 1 Mtep ‘un million de tonnes équivalent pétrole’

« Royaume-Uni » = 60 millions de personnes
 Consommation énergétique des États-Unis : 250 kWh/j par personne
 Consommation énergétique en Europe : 125 kWh/j par personne

Les unités les plus fréquemment utilisées dans les documents publics qui parlent de puissance et d'énergie sont les suivantes :

térawatts-heures par an (TWh/an).	1 000 TWh/an par France $\simeq$ 45 kWh/j par personne.
gigawatts (GW).	2,5 GW par France $\simeq$ 1 kWh/j par personne.
million de tonnes équivalent pétrole par an (Mtep/an).	2 Mtep/an par France $\simeq$ 1 kWh/j par personne.

Table de conversion au sujet du carbone



kWh taux de conversion pour l'énergie *chimique* :

1 kWh $\leftrightarrow$ 250 g de CO₂ (pétrole, essence)
(pour le gaz, 1 kWh $\leftrightarrow$ 200 g)

kWh(e) l'énergie *électrique* est plus coûteuse dans la plupart des pays, mais pas en France :

1 kWh(e) $\leftrightarrow$ 445 g de CO₂ (R-U, gaz prédominant)
1 kWh(e) $\leftrightarrow$ 180 g de CO₂ (Fr., nucléaire prédom.)
(Le charbon coûte deux fois plus cher en CO₂ que le gaz ; le nucléaire coûte un vingtième : 16 g/kWh(e).)

t CO₂ tonne de CO₂

Mt C million de tonnes de carbone

« Roy.-Uni » = 60 millions de personnes

« France » = 65 millions de personnes

« Monde » = 6,5 milliards de personnes

Roy.-Uni : 160 Mt C par an (2005)

France : 105 Mt C par an (2005)

États-Unis : 5,5 t C/pers. par an
(1 500 Mt C/an au total)

Monde : 7 Gt C par an (2005)

Site Web de ce livre

Faites enregistrer votre livre : recevez des mises à jour, soyez informés des apparitions publiques de l'auteur, et des rabais sur les prochaines éditions.

www.uit.co.uk/register

Ressources pour votre livre : liens pour approfondir votre lecture, commentaires de lecture ou sur des questions thématiques faits par l'auteur, et plus encore.

www.uit.co.uk/resources

Nouvelles : livres à venir, événements, commentaires, entretiens, podcasts, etc.

www.uit.co.uk/news

Rejoignez nos listes de diffusion : abonnez-vous à nos bulletins thématiques par e-mail.

www.uit.co.uk/subscribe

Commandez nos livres en ligne. Si vous vendez des livres, découvrez nos distributeurs ou contactez-nous et parlez-nous de vos besoins particuliers. *www.uit.co.uk/order*

Presse/média/vente : pour les images de couverture, ou pour un entretien ou une rencontre avec l'auteur, etc. *www.uit.co.uk/order*

Envoyez-nous une proposition de livre : si vous avez envie d'écrire — et même si vous n'avez encore que le tout début d'une idée — nous aimerions beaucoup en parler avec vous. Nous sommes fiers de soutenir nos auteurs et de rendre l'écriture d'un livre aussi satisfaisante et aisée que possible.

www.uit.co.uk/for-authors

UIT Cambridge Ltd.
PO Box 145
Cambridge
CB4 1GQ
Angleterre — England

E-mail : *inquiries@uit.co.uk*

Téléphone : **+44 1223 302 041**