

ENVIRONNEMENT

LIMITES PLANÉTAIRES

COMPRENDRE (ET ÉVITER) LES MENACES
ENVIRONNEMENTALES DE L'ANTHROPOCÈNE



Mai 2019

Aurélien Boutaud & Natacha Gondran (Veille prospective DPDP)

GRANDLYON
la métropole

Nous sommes entrés depuis la révolution industrielle dans une période inédite de l'histoire de la Terre, que certains proposent d'appeler l'Anthropocène : une nouvelle ère qui se caractérise par le fait qu'homo sapiens est devenu le principal facteur de modification des équilibres écologiques à l'échelle planétaire. Ces bouleversements provoqués par les activités humaines pourraient nous faire sortir des conditions favorables et relativement stables de l'Holocène, dont nous bénéficions depuis plus de 10.000 ans. Au tournant des années 2010, des chercheurs issus de différentes disciplines ont proposé d'établir un état des lieux des processus environnementaux qui pourraient mener à un effondrement. Pour chacun de ces enjeux, ils proposent des frontières qu'il vaudrait mieux ne pas dépasser si l'humanité désire maintenir le « système Terre » dans les conditions favorables qui ont jusqu'ici été celles de l'Holocène. Ce rapport décrypte l'état des lieux dressé par les scientifiques et présente quelques pistes pour limiter les processus les plus préoccupants, aussi bien à l'échelle globale qu'à celle de la Métropole de Lyon.

SOMMAIRE

INTRODUCTION :

LES LIMITES PLANÉTAIRES ET LEUR CONTEXTE	4
LE CHANGEMENT CLIMATIQUE	12
L'ACIDIFICATION DES OCÉANS	22
LES PERTURBATIONS DU CYCLE DE L'AZOTE	28
LES PERTURBATIONS DU CYCLE DU PHOSPHORE	38
LES PERTURBATIONS DU CYCLE DE L'EAU DOUCE	48
L'APPAUVRISSEMENT DE LA COUCHE D'OZONE STRATOSPHERIQUE	58
L'ACCROISSEMENT DE LA CHARGE ATMOSPHERIQUE EN AÉROSOLS	66
LES MENACES SUR L'INTÉGRITÉ DE LA BIOSPHERE	76
LE CHANGEMENT D'AFFECTATION DES SOLS	86
LE NOUVELLES POLLUTIONS CHIMIQUES	94

CONCLUSION :

UNE APPROCHE SYSTÉMIQUE DES ENJEUX PLANÉTAIRES ET DES POLITIQUES PUBLIQUES	104
---	------------

- **Coordination**

DPDP : Nicolas Leprêtre

- **Rédaction**

Aurélien Boutaud, membre du réseau de prospective

- **Illustration** : Skoli, les Zinc

- **Conception & Mise en page :**

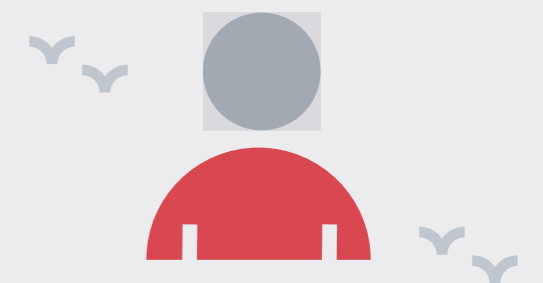
Nathalie Joly (DPDP)

- **Impression** : Métropole de Lyon / Service de la Reprographie

Remerciements :

aux services de la Métropole et à l'Agence d'urbanisme de Lyon

Juin 2019



INTRODUCTION : LES LIMITES PLANÉTAIRES ET LEUR CONTEXTE

UN DÉBAT ANCIEN, RENOUVELÉ DANS LE CONTEXTE DE L'ANTHROPOCÈNE

Les limites écologiques, un débat ancien...

Les limites imposées par la nature à l'expansion humaine ont depuis longtemps fait l'objet de débats, notamment parmi les économistes (Vivien, 2005). Pendant près de deux siècles, ce sont essentiellement les limites des ressources naturelles qui ont été le cœur des interrogations entre deux camps. D'un côté, les « malthusiens » considéraient que la croissance économique et démographique finirait par buter sur l'épuisement des ressources naturelles, qui entraînerait alors un effondrement de la productivité aux conséquences dramatiques. De l'autre côté, les « cornucopiens » (terme créé en référence au mythe de la « corne d'abondance ») pensaient au contraire que l'ingéniosité humaine permettrait d'accroître indéfiniment les capacités d'exploitation des ressources naturelles : par exemple en intensifiant leur exploitation ou, *in fine*, en substituant les ressources devenues rares par d'autres supposées plus abondantes.

Pendant deux siècles, la réalité a semblé donner raison aux cornucopiens. Grâce à l'intensification de l'agriculture – et l'invention en particulier des engrais minéraux – la production alimentaire s'est considérablement accrue, donnant tort aux prédictions de Thomas Malthus. La mécanisation et l'exploitation des énergies fossiles ont de leur côté permis de démultiplier les capacités de production industrielle, rendant accessible un niveau de vie matériel toujours plus élevé à un nombre grandissant de personnes. Mais si elle a momentanément résolu la question des ressources, cette intensification de l'exploitation de la nature n'a pas été sans conséquences sur les équilibres écologiques. L'utilisation massive d'engrais azoté et phosphaté a par exemple gravement perturbé les cycles biogéochimiques, entraînant de multiples pollutions des milieux aquatiques et terrestres. Quant aux énergies fossiles, il a fallu attendre la seconde moitié du vingtième siècle pour réaliser que leur combustion avait des effets délétères sur le fonctionnement du climat.

...qui s'est renouvelé avec l'avènement de l'Anthropocène

Changement climatique, érosion de la biodiversité, destruction des milieux naturels, concentration de polluants atmosphériques, accumulation de produits chimiques dans les cycles du vivant, perturbation des cycles biogéochimiques, dégradation des ressources en eau douce, acidification des océans, épuisement des sols, fragilisation de la couche d'ozone stratosphérique... au tournant du XXI^e siècle, Will Steffen et plusieurs de ses collègues compilent les études scientifiques et montrent l'évolution de la pression exercée par l'humanité sur la nature depuis 1750 (Steffen et al., 2004). La compilation des courbes, qui montrent presque toutes une croissance exponentielle à partir du XIX^e siècle, est spectaculaire (cf. Figure 1). Elle viendra conforter l'idée que nous sommes entrés, à partir du XIX^e siècle, dans une nouvelle phase de l'histoire de la Terre marquée par ce fait majeur : homo sapiens est devenu le principal facteur de modification des équilibres écologiques à l'échelle planétaire. Une nouvelle ère que Paul Crutzen et Eugène Stoermer proposent d'appeler l'Anthropocène (Crutzen & Stoermer, 2000).

Vers une lecture systémique des problèmes

Au tournant des années 2000, le changement climatique va révéler la nécessité d'une gouvernance planétaire des enjeux écologiques. Constatant l'échec des négociations internationales sur le climat à réduire les émissions mondiales de gaz à effet de serre, plusieurs scientifiques comme Paul Crutzen, prix Nobel de Chimie et co-inventeur de la notion d'Anthropocène, vont promouvoir des solutions technologiques de rupture comme, par exemple, le refroidissement artificiel des basses couches de l'atmosphère. Ces solutions, dites de géo-ingénierie, ont provoqué au début des années 2000 un vif débat dans la communauté scientifique, de nombreux auteurs pointant du doigt les

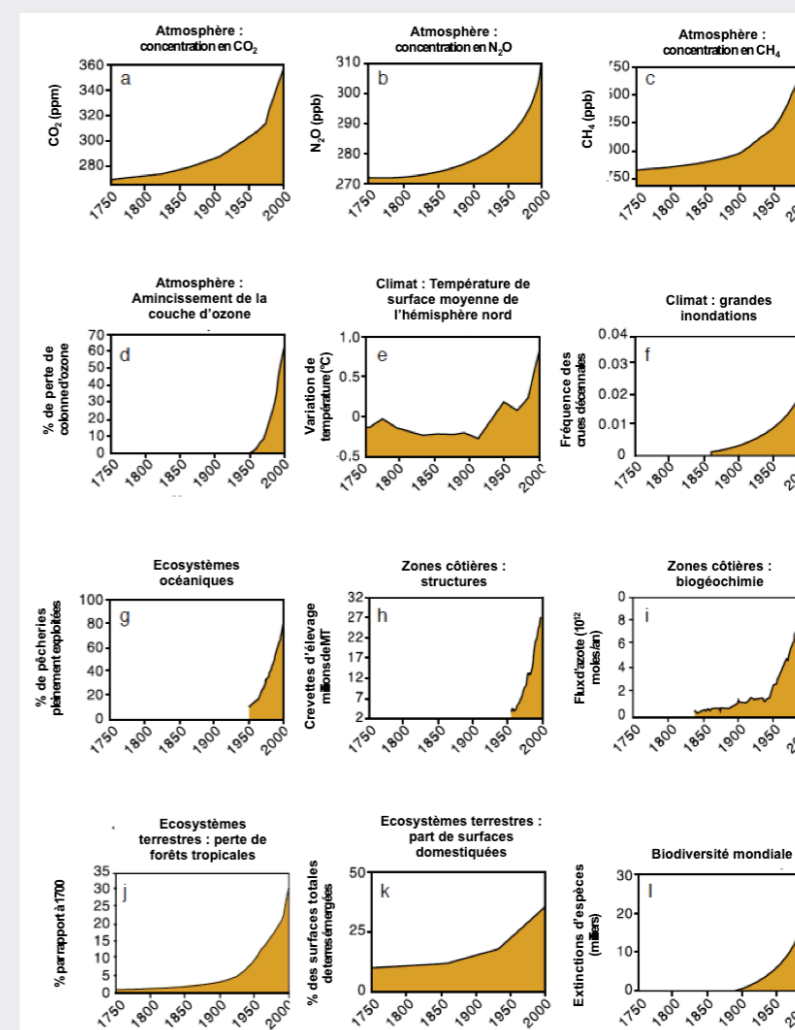
La notion d'Anthropocène...

...s'inscrit dans une longue histoire puisque, dès la seconde moitié du XIX^e siècle, plusieurs auteurs font déjà référence à l'impact globalisé de l'humain sur la planète. Au XX^e siècle, le constat de l'empreinte humaine sur la biosphère va se préciser, et plusieurs voix vont participer à sa prise de conscience : c'est le cas de Vladimir Vernadski dès les années 1920, puis celui de James Lovelock qui emportera un franc succès dans les années 1970 en présentant son hypothèse Gaïa : la Terre vue comme un organisme vivant subissant les assauts de sa composante humaine. À la même époque, le Club de Rome publie un ouvrage retentissant fondé sur la modélisation des interactions entre l'homme et la nature, qui montre l'impossibilité d'une croissance infinie dans un monde fini. Mais malgré quelques usages précurseurs, c'est seulement en 2000 que le terme d'Anthropocène va être rendu populaire (Steffen et al., 2011).

À partir de cette date, la notion d'Anthropocène va faire l'objet de vigoureux débats. Si elle n'est toujours pas reconnue officiellement comme une période géologique à part entière par les géologues, cela n'a pas empêché son succès dans d'autres disciplines. Les historiens de l'environnement débattent par exemple de la date de début de l'Anthropocène, qui est parfois proposée à 1784, année d'invention de la machine à vapeur qui préfigure la révolution industrielle. La date de 1945 est proposée comme début d'une seconde phase de l'Anthropocène, caractérisée par une « grande accélération » des processus d'emprise de l'homme sur la nature – ce que confirmerait la plupart des courbes présentées ci-dessous.

D'autres historiens sont en revanche plus sceptiques sur la pertinence du terme. Christophe Bonneuil et Jean-Baptiste Fressoz reprochent par exemple à cette notion d'être trop ouvertement tournée sur l'émergence des technologies qui ont engendré les détériorations de l'environnement (par exemple la machine à vapeur) alors que ce sont des processus politiques et sociaux qui sont également à l'œuvre (le capitalisme, l'industrialisme, etc.). Ce biais pourrait par ailleurs favoriser selon eux l'idée d'une solution technique au détriment de solutions politiques ou sociales. Plutôt que le terme d'Anthropocène, ils proposent ceux d'Occidentalocène, d'Industrialocène ou encore de Capitalocène, qui pointent du doigt plus précisément de leur point de vue les causes de la destruction de la nature (Bonneuil & Fressoz, 2013).

Figure 1 : Évolution de quelques paramètres environnementaux à l'échelle planétaire (traduit et adapté de Steffen et al., 2004)



effets collatéraux potentiellement catastrophiques de ces technologies. Par exemple, la dispersion de particules de soufre dans l'atmosphère (qui est proposée par les partisans de la géo-ingénierie afin de limiter le rayonnement solaire dans les basses couches de l'atmosphère) aurait des effets probables sur la photosynthèse et toute la chaîne du vivant. Qui plus est, elle permettrait de refroidir le climat sans s'attaquer aux autres conséquences néfastes des rejets de CO₂ dans l'atmosphère, comme l'acidification des océans, pour lesquels il faudrait alors trouver d'autres techniques de géo-ingénierie... au risque d'une course à l'abîme.

C'est notamment pour mettre en évidence la complexité des enjeux environnementaux – et la dangerosité des solutions monocritères comme la géo-ingénierie – que plusieurs chercheurs se sont réunis en 2008 à l'initiative du Stockholm Resilience Centre (de l'Université de Stockholm) afin de réfléchir à une approche concurrente (Steffen et al., 2011). Pour reprendre les termes d'un de ces chercheurs, il s'agissait d'offrir « un nouveau cadre à travers lequel notre compréhension scientifique du système Terre peut être utilisée plus directement dans les processus de décision sociétales » (Stockholm Resilience Centre, non daté).

LES « FRONTIÈRES » PLANÉTAIRES : QUELQUES CLÉS DE COMPRÉHENSION

Déterminer un espace de sécurité pour l'humanité au sein du système Terre

Venus de spécialités et d'horizons très différents, les chercheurs réunis en 2008 se réclament d'une discipline commune : la « science du système Terre » (Earth System Science), une approche scientifique issue de la systémique et qui étudie les interactions des différentes composantes de la planète Terre : biosphère, atmosphère, lithosphère, hydrosphère, etc. L'objectif qu'ils se proposent est de définir les conditions nécessaires au maintien d'un état d'équilibre dynamique du système Terre. Dit autrement, il s'agit d'identifier les variables qui déterminent l'équilibre dans lequel la planète se trouve depuis les débuts de l'holocène, cette période débutée il y a plus de 10.000 ans et qui se caractérise par des conditions de vie particulièrement stables et favorables. Cette période, qui devrait se prolonger pendant encore plusieurs milliers d'années, coïncide avec les débuts de l'agriculture et a permis l'émergence des civilisations humaines.

L'objectif des chercheurs est donc de dresser une liste des processus qui régulent la stabilité du système Terre et, pour chacun d'entre eux, d'identifier les limites à ne pas dépasser si l'humanité veut prolonger les conditions de vie de l'holocène. Cette démarche permet de tracer les contours d'un « espace de fonctionnement sécurisé pour l'humanité » (« a safe operating space for humanity », Röckstrom et al., 2009)

Neuf processus environnementaux proposés...

Les chercheurs ayant participé à la rédaction de l'article original de 2009 ont proposé neuf processus environnementaux qu'ils considèrent comme devant faire l'objet d'une surveillance particulière.

Parmi les neufs, trois sont susceptibles de présenter des risques de rupture ou de dysfonctionnement qui se manifestent à l'échelle planétaire :

- le changement climatique
- l'acidification des océans
- l'affaiblissement de la couche d'ozone stratosphérique

Les six autres processus ont des impacts jusqu'à présent essentiellement locaux ou régionaux mais qui, en s'agrégeant ou en interagissant, peuvent avoir des effets à l'échelle planétaire :

- la perturbation des cycles biogéochimiques de l'azote et du phosphore
- la charge atmosphérique en particules



Rétroactions positives et négatives :

Les éléments qui composent un système sont reliés et interagissent entre eux. Par exemple, dans un écosystème, les populations des différentes espèces de la chaîne alimentaire interagissent dans un processus qui tend vers un équilibre dynamique : la population de prédateurs dépend de la population des proies, qui elle-même dépend d'autres facteurs de productivité de l'écosystème (climat, sols, etc.). Les termes « positif » et « négatif » ne sont pas des jugements de valeur et leur utilisation par les scientifiques peut paraître contre-intuitive : on parle de rétroaction négative quand les interactions entre les éléments d'un système tendent vers un équilibre dynamique, c'est à dire une régulation du système. Par exemple, si les prédateurs sont trop nombreux, la population de proies baisse, ce qui réduit les possibilités de développement des prédateurs, etc. Il arrive toutefois que se mettent en œuvre des rétroactions positives, qui au contraire des rétroactions négatives amplifient les écarts avec un état stable.

Cette situation peut mener dans certains cas à des ruptures de régime (le passage d'un état d'équilibre dynamique à un autre) voire à des effondrements du système.

Dans le cas du système Terre, de nombreux processus environnementaux présentent des risques de rétroactions positives, pouvant donc créer des déséquilibres notables. Par exemple, la séquestration du CO₂ atmosphérique par les océans a jusqu'à présent permis de limiter le changement climatique (rétroaction négative) ; mais elle entraîne une acidification des océans qui, associée au réchauffement, menace les conditions de vie de certains organismes vivants comme les coraux, dont la disparition aurait des effets en chaîne sur les très nombreuses espèces marines qui peuplent les récifs coralliens. Qui plus est, la capacité de séquestration du CO₂ atmosphérique par les océans diminuant, l'effet de serre pourrait s'accroître.

- la perturbation des cycles de l'eau douce
- le changement d'affectation des sols (déforestation)
- l'atteinte à l'intégrité de la biosphère (biodiversité)
- l'introduction de nouvelles entités dans l'environnement (pollutions chimiques notamment)

Les processus en question sont également de natures très différentes en cela qu'ils ne menacent pas de la même manière les équilibres planétaires. Certains processus présentent une menace directe de déséquilibre du système Terre : c'est le cas par exemple du changement climatique dont le dérèglement peut potentiellement affecter tous les autres équilibres planétaires. D'autres processus réduisent la résilience du système Terre, c'est à dire sa capacité à s'adapter et à retrouver un état d'équilibre après un choc ou une crise : c'est le cas par exemple de la biodiversité, qui est un gage de résilience de la biosphère face à certaines pressions (comme le changement climatique). Autrement dit, certains processus concernent des menaces de déséquilibre du système Terre, d'autres concernent les capacités de résilience du système Terre face à ces menaces. Bien que de natures différentes, ces processus sont aussi importants les uns que les autres.

Enfin, de nombreux processus du système Terre sont étroitement liés, ce qui signifie qu'ils peuvent générer des rétroactions négatives ou positives. Dans ce dernier cas, la détérioration d'un processus peut aggraver la situation d'un autre, avec des effets en cascade qui peuvent s'avérer dramatiques (cf. encadré).

...et pour chaque processus, des frontières à ne pas dépasser

L'une des grandes originalités de la démarche consiste à identifier des limites au-delà desquelles les processus en question menacent de générer des ruptures d'équilibre du système Terre. L'idée est de proposer un seuil en-deçà duquel il est prudent de se maintenir pour préserver l'équilibre relatif qui a prévalu tout au long de l'Holocène. Cette démarche est particulièrement louable dans une perspective d'aide à la décision. Mais elle est en revanche extrêmement difficile à concrétiser, principalement pour deux raisons :

1. Il n'existe pas toujours de limite planétaire au-delà de laquelle un risque de rupture est identifiable, notamment lorsque les variations générées sont lentes et diffuses, ou lorsque le processus en jeu concerne la résilience du système. Par exemple, les bouleversements du cycle de l'azote et du phosphore ont des impacts qui sont difficiles à globaliser de par la nature locale ou régionale des dysfonctionnements qu'ils génèrent (eutrophisation des cours d'eau, par exemple).
2. Même lorsqu'une limite planétaire existe, comme c'est le cas pour le changement climatique, la connaissance scientifique n'est généralement pas suffisante pour déterminer très précisément un seuil de « rupture » (c'est à dire une limite au-delà de laquelle le système changerait radicalement de fonctionnement). Cette limite se situe en général dans une zone d'incertitude : par exemple pour le changement climatique elle se situe à des niveaux de concentration de CO₂ dans l'atmosphère compris entre 350 et 550 ppm. Établir un chiffre unique de basculement peut donc être réducteur et risque de focaliser les débats sur le dépassement d'une valeur qui ne demeure qu'indicative d'un ordre de grandeur.

C'est la raison pour laquelle les chercheurs rassemblés à l'initiative du *Stockholm Resilience Centre* complètent la notion de limite par le terme de « frontière » ou de « borne » (boundary, cf. Figure 2). La notion de frontière fait entrer en jeu des considérations sociétales qui renvoient au risque que la société est prête à prendre, à court et à moyen



Variables de contrôle : identifier les indicateurs pertinents

Les notions de « variable de contrôle » et de « variable de réponse » sont souvent utilisées en modélisation des systèmes. Notions inspirées de l'automatisme, il s'agit de considérer le système étudié comme une « boîte noire » sans chercher à le représenter complètement, afin d'observer comment son état (« variable de réponse ») évolue en fonction d'une stimulation d'entrée (modification de la « variable de contrôle »). Il s'agit de simplifier la représentation d'un système complexe en observant comment il réagit à l'évolution d'une perturbation, ou d'un signal d'entrée. Will Steffen et ses collègues reconnaissent cependant qu'une telle simplification présente des limites pour l'ensemble du système Terre : certaines variables de contrôle peuvent être géographiquement hétérogènes pour de nombreux processus écologiques. Il peut y avoir différentes interactions entre des variables de contrôle au niveau régional et l'écosystème Terre au niveau planétaire. Par exemple, les changements climatiques globaux peuvent affecter certaines zones qui fonctionnent aujourd'hui comme des puits de carbone (zones humides telles que les tourbières, par exemple), et qui risquent alors de perdre leur rôle de puits de carbone et contribuer encore davantage au changement climatique global. Will Steffen et ses collègues proposent dans ce cas de définir des limites régionales en interaction avec les limites planétaires. On ne considère alors pas un seul

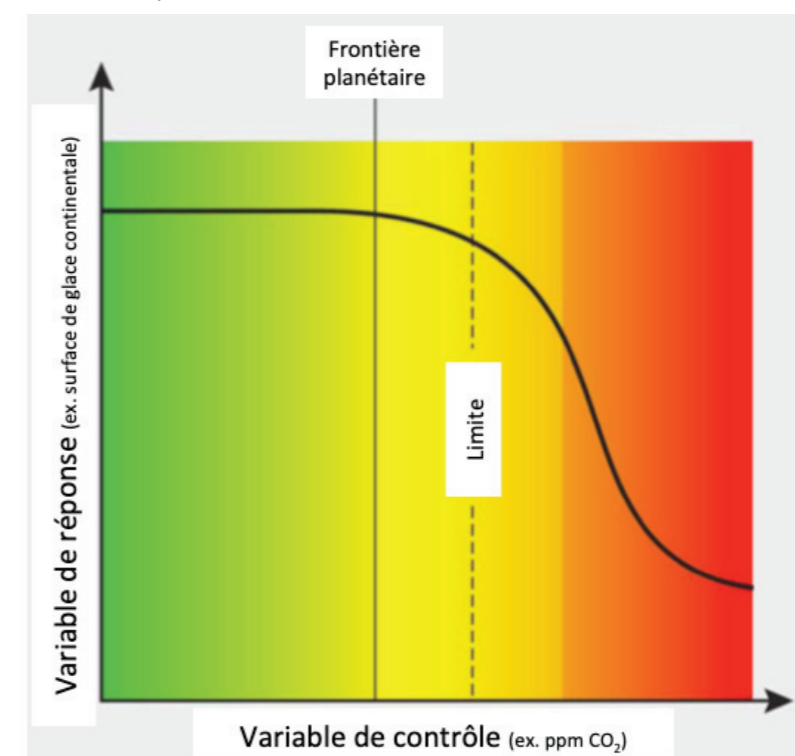
système (une boîte noire), mais plusieurs sous-systèmes en interactions.

Pour les processus écologiques où des dynamiques régionales jouent un rôle critique dans la dynamique planétaire, Will Steffen et ses collègues proposent un cadre à double niveau de variables de contrôle et de limites planétaires. Ainsi, le niveau géographique d'analyse des six limites planétaires étudiées n'est pas le même (Steffen et al., 2015) :

- Les modifications de l'intégrité de la biodiversité apparaissent au niveau des biomes (ou macro-écosystèmes) terrestres, des grands écosystèmes marins ou d'eau douce.
- En ce qui concerne la régulation biophysique du climat, l'échelle pertinente est celle du biome forestier.
- Les flux et l'utilisation d'eau douce s'effectuent à l'échelle des principaux bassins versants et doivent donc être caractérisés à des échelles éventuellement très locales.
- Les modifications des flux biogéochimiques (cycles du phosphore et de l'azote) sont des flux planétaires qui agrègent des perturbations très locales mais potentiellement très fortes (dans des zones d'agriculture intensive). Ces deux niveaux d'analyse sont donc nécessaires.

Figure 2 : Le concept de frontière planétaire

Lorsqu'une limite planétaire existe et peut être décrite à partir d'une variable de contrôle (un indicateur), elle est généralement située dans une zone d'incertitude comprise entre une valeur haute et une valeur basse. La frontière planétaire équivaut à la valeur basse de l'incertitude : ainsi, ne pas franchir cette frontière permet à l'humanité de rester dans une zone « sûre » (adapté de Röckstrom et al., 2009, & Steffen et al., 2015)



■ Espace opérationnel de sécurité ■ Zone d'incertitude (risque accru) (ex. 350 ppm CO₂) ■ Niveau dangereux (risque élevé) (ex. 550 ppm CO₂)

terme, dans un contexte marqué par l'incertitude scientifique quant au positionnement de la limite. La société peut choisir d'éviter à tout prix le risque : dans ce cas la frontière est positionnée à la valeur basse de l'incertitude scientifique de la limite (350 ppm pour le cas du climat). Mais la société peut également choisir de fixer comme frontière la valeur haute : dans ce cas la limite a de fortes probabilités d'être franchie (550 ppm pour le climat).

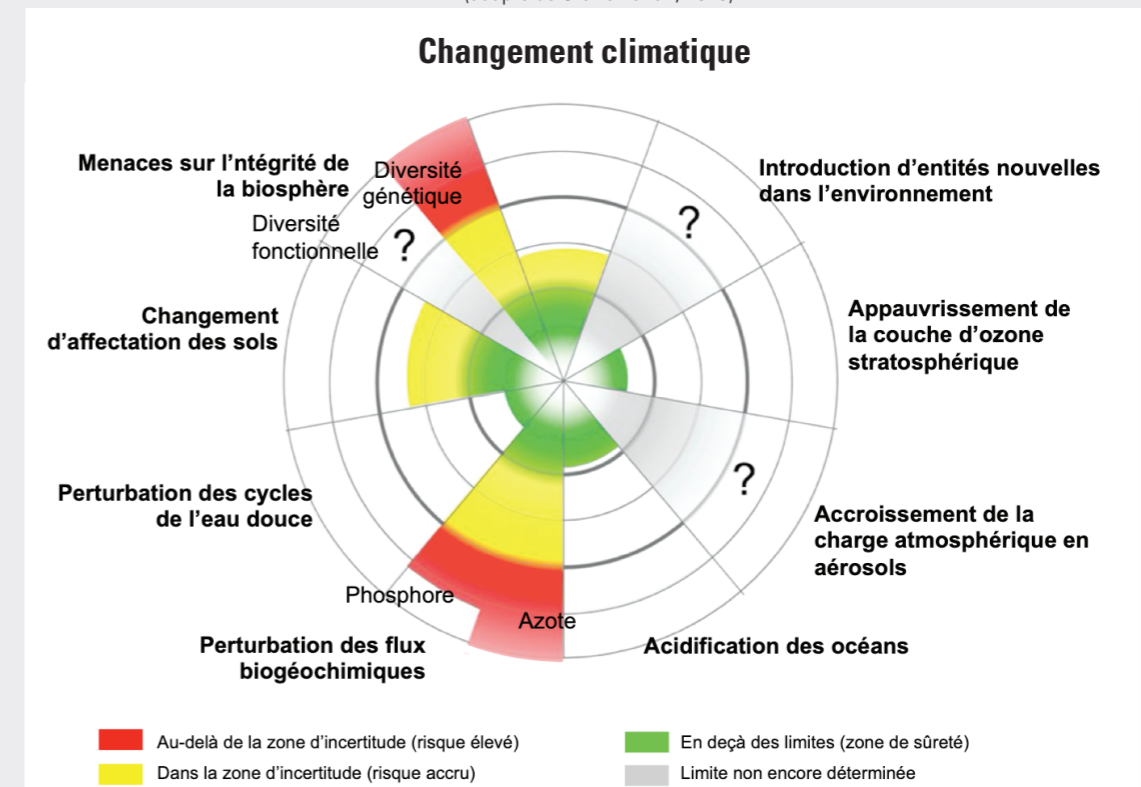
Cherchant à définir un « espace opérationnel de sécurité pour l'humanité », le parti pris assumé des auteurs consiste à appliquer le principe de précaution en fixant la frontière au niveau de la valeur basse de l'incertitude scientifique de la limite. Autrement dit, la frontière est systématiquement située en dessous de la limite, afin d'éviter un dépassement de celle-ci. Une telle mesure présente également l'avantage d'offrir à la société la possibilité d'établir une « zone tampon » permettant d'anticiper le risque identifié et de s'organiser pour réagir aux signaux précoces.

Pour mieux comprendre ces différences entre limite et frontière, on peut faire l'analogie avec le compteur de vitesse d'un véhicule dont la fiabilité (incertitude) serait de plus ou moins 10 km/h. Afin d'être certain de ne pas dépasser la limite autorisée de 80 km/h, le conducteur devrait alors éviter de dépasser les 70 km/h à son compteur de vitesse. Compte-tenu des incertitudes, 70 km/h est donc la « frontière » en deçà de laquelle le conducteur est certain de ne pas dépasser la « limite ».

Proposer une vision d'ensemble du dépassement des frontières planétaires

L'équipe réunie autour du Stockholm Resilience Centre a pu proposer des variables de contrôle pour huit des neufs processus planétaires identifiés. Une frontière a pu être déterminée au niveau global pour sept d'entre eux. Les valeurs les plus récentes ont ensuite été comparées à ces seuils, permettant de donner une image de l'état actuel du dépassement des frontières planétaires (cf. Figure 3).

Figure 3 : L'état actuel des variables de contrôle pour sept des neuf frontières planétaires (adapté de Steffen et al., 2015)



BIBLIOGRAPHIE

- Crutzen P.J., Stoermer E.F., 2000. « The Anthropocene », Global Change, NewsLetter, n°41, pp. 17-18.
- Rockström, J., W. Steffen, K. Noone, Å. Persson, F. S. Chapin, III, E. Lambin, T. M. Lenton, M. Scheffer, C. Folke, H. Schellnhuber, B. Nykvist, C. A. De Wit, T. Hughes, S. van der Leeuw, H. Rodhe, S. Sörlin, P. K. Snyder, R. Costanza, U. Svedin, M. Falkenmark, L. Karlberg, R. W. Corell, V. J. Fabry, J. Hansen, B. Walker, D. Liverman, K. Richardson, P. Crutzen, and J. Foley, 2009. « Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity ». Ecology and Society n°14(2): 32. – <http://www.ecologyandsociety.org/vol14/iss2/art32/>
- Rockstrom, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, A., Chapin, F.S., Lambin, E.F., Lenton, T.M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H.J., Nykvist, B., De Wit, C.A., Hughes, T., Van Der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P.K., Costanza, R., Svedin, U., Falkenmark, M., Karlberg, L., Corell, R.W., Fabry, V.J., Hansen, J., Walker, B., Liverman, D., Richardson, K., Crutzen, P., Foley, J.A., 2009. « A safe operating space for humanity », Nature, n°461, pp.472–475
- Steffen W., et al., 2004. « Global Change and the Earth System. A Planet Under Pressure », IGBP, Royal Swedish Academy of Sciences, Stockholm.
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S.E., Fetzer, I., Bennett, E.M., Biggs, R., Carpenter, S.R., Vries, W. de, Wit, C.A. de, Folke, C., Gerten, D., Heinke, J., Mace, G.M., Persson, L.M., Ramanathan, V., Reyers, B., Sörlin, S., 2015. « Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet ». Science n°347, 1259855. doi:10.1126/science.1259855
- Steffen W., Crutzen P., Grinevald J., McNeill J., 2011. « The Anthropocene: conceptual and historical perspectives », Philosophical transactions of the royal society, n°349, 2011, pp.862-867 – <https://royalsocietypublishing.org/doi/full/10.1098/rsta.2010.0327>
- Stockholm Resilience Centre, non daté. « Background. How did the research on planetary boundaries come about ? » publié sur le site du Stockholm Resilience centre – <https://www.stockholmresilience.org/research/planetary-boundaries/planetary-boundaries/background.html>

LE CHANGEMENT CLIMATIQUE



■ QU'EST-CE QUE C'EST ?

L'holocène, une période interglaciaire caractérisée par une certaine stabilité climatique

Le climat de la planète a beaucoup varié depuis ses origines. L'ère quaternaire, dans laquelle nous sommes depuis 2,58 millions d'années, est elle-même marquée par des cycles climatiques alternant des ères glaciaires, qui durent environ 80 à 100.000 ans, auxquelles succèdent des ères interglaciaires plus courtes, qui peuvent durer de 10 à 30.000 ans. Les écarts de température moyenne entre ères glaciaires et interglaciaires varient de 5 à 8°C environ. Ces changements d'ère climatique s'expliquent essentiellement par des évolutions de l'exposition de la Terre au rayonnement solaire, dues à des variations de certains paramètres astronomiques (variation de l'ellipse de la Terre ou encore de l'inclinaison de celle-ci sur son orbite). La période interglaciaire dans laquelle nous sommes entrés il y a un peu plus de 11.000 ans – et qui durera encore plusieurs milliers d'années – est connue sous le nom d'holocène. Il s'agit d'une période au climat clémente et globalement stable, marquée par de petites variations (d'environ +/- 1°C) comme par exemple l'optimum climatique médiéval ou le petit âge glaciaire, qui s'expliquent notamment par des variations de l'intensité du rayonnement solaire.

L'atmosphère joue un rôle majeur dans la régulation du climat, notamment via l'effet de serre

L'exposition de la Terre au rayonnement solaire ne suffit toutefois pas à expliquer toutes les évolutions des températures. La composition de l'atmosphère joue également un rôle considérable. Lorsque les rayons du soleil atteignent la couche superficielle de l'atmosphère terrestre, ils se composent de rayonnements électromagnétiques de différentes longueurs d'onde (ultra-violet, lumière visible, infra-rouges). Environ 30 % de ce rayonnement rencontre des obstacles dans la haute atmosphère (notamment des nuages et des aérosols) et se trouve directement réémis vers l'espace. Le reste (70 %) vient alors réchauffer la surface du globe et les éléments qui la constituent. La surface terrestre va alors réémettre vers l'espace ce rayonnement d'énergie, majoritairement sous forme de rayons infrarouges dont la longueur d'onde est plus élevée (cf. Figure 1).

Or, certains gaz constitutifs de l'atmosphère comme par exemple le gaz carbonique (CO₂) et le méthane (CH₄) ont la particularité de laisser passer sans encombre les rayons visibles qui nous viennent du soleil mais de faire obstacle aux infrarouges qui sont réémis de la surface de la planète vers l'espace. Ces gaz à effet de serre (GES) vont donc réverbérer à leur tour la majorité des infrarouges émis par la planète en les renvoyant vers la surface de la Terre. Grâce à cet effet de serre naturel, la température moyenne de la surface terrestre atteint les 15°C et s'avère favorable à la vie telle que nous la connaissons... alors que sans effet de serre cette température serait seulement de -18°C.

Des teneurs en gaz à effet de serre stables depuis plusieurs milliers d'années

Pendant une ère climatique comme l'holocène, les variations secondaires du climat peuvent donc s'expliquer par de légers changements d'intensité du rayonnement solaire, mais aussi par des changements de composition de l'atmosphère – par exemple consécutivement à des phases d'éruptions volcaniques intenses qui peuvent provisoirement refroidir l'atmosphère. Des périodes un peu plus chaudes, comme celles des optimums climatiques médiéval et romain, s'expliquent majoritairement par des variations du rayonnement solaire, alors que la composition de l'atmosphère – notamment en GES – est restée homogène au cours des derniers milliers d'années... en tout cas jusqu'à la fin du XIX^e siècle.

Figure 1 : Le bilan radiatif de la terre et le fonctionnement simplifié de l'atmosphère (Jancovici, 2002)

Les chiffres représentent la valeur moyenne temporelle (sur l'année) et géographique (sur la surface de la planète) en Watts par mètre carré, de chaque flux d'énergie représenté.

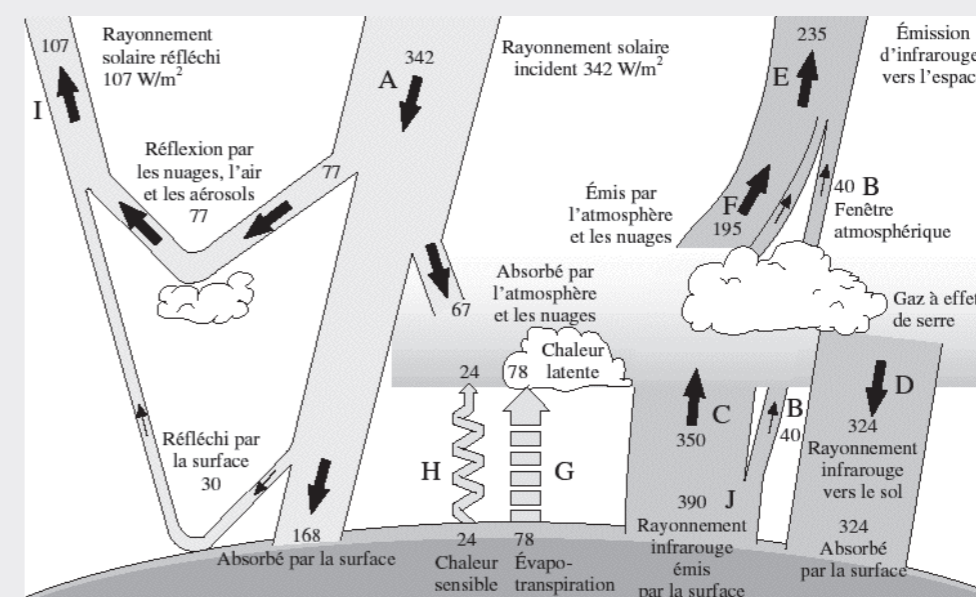


Figure 2 : Concentrations moyennes de trois gaz à effet de serre dans l'atmosphère (IPCC, 2018)

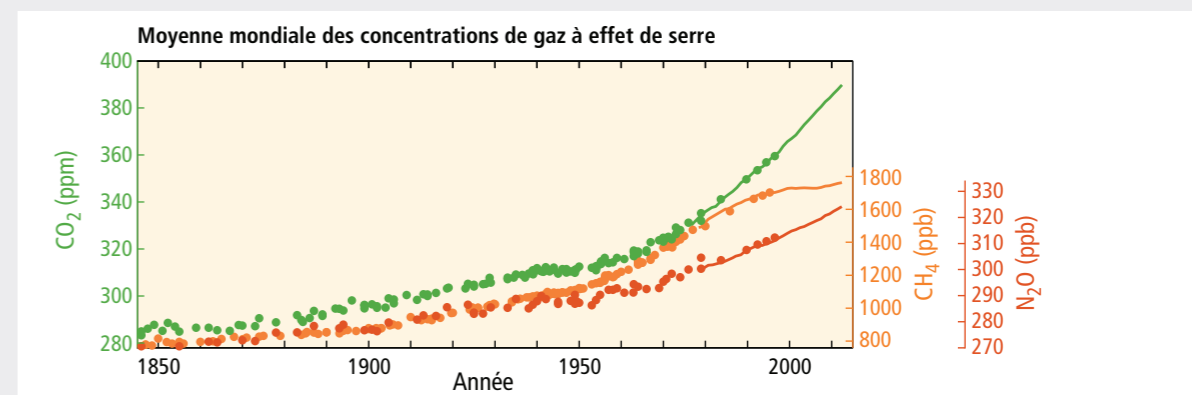
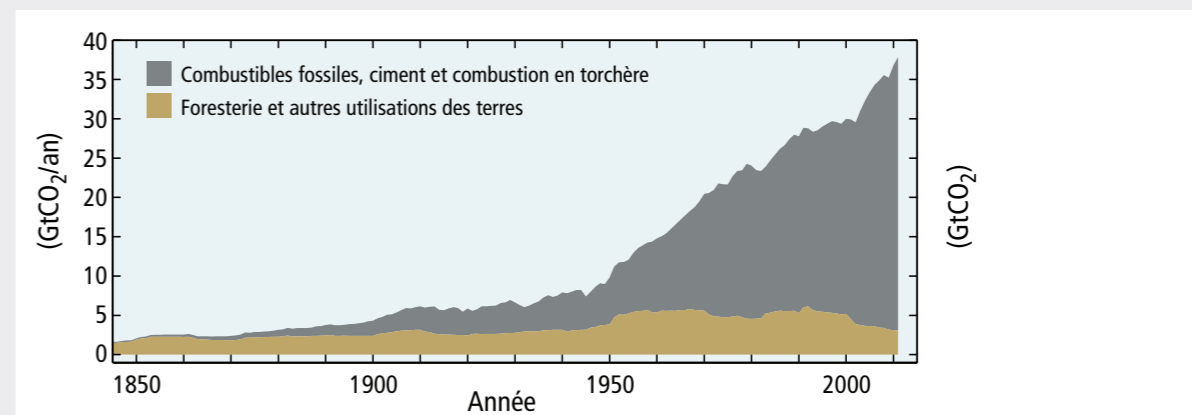


Figure 3 : Émissions anthropiques mondiales de CO₂ (IPCC, 2018)



■ QUEL EST LE PROBLÈME ?

Un renforcement de l'effet de serre d'origine anthropique...

Les teneurs en GES de l'atmosphère ont commencé à s'accroître à partir de la seconde moitié du XIX^e siècle et le phénomène s'est considérablement accéléré depuis la seconde moitié du XX^e (cf. Figure 2, p.13). Depuis 1850, la concentration de CO₂ dans l'atmosphère est ainsi passée de 280 à plus de 400 ppm (+45 %), celle de méthane (CH₄) est montée de 800 à 1800 ppb (+125 %) et celle de protoxyde d'azote (N₂O) a augmenté de 270 à 330 ppb (+22 %).

Ces évolutions sont liées aux activités humaines. Pour le CO₂ par exemple, l'essentiel du déséquilibre est dû à la combustion massive d'énergies fossiles qui a considérablement déstabilisé le cycle biogéochimique du carbone : le carbone stocké depuis des millions d'années dans la lithosphère sous forme d'hydrocarbures (gaz, pétrole, charbon) a été déversé en quelques décennies dans l'atmosphère. Plus marginalement, la déforestation et la production de ciment (lors de son processus de fabrication) participent également à cet accroissement du CO₂ dans l'atmosphère (cf. Figure 3, p.13).

Pour ce qui concerne le méthane et le protoxyde d'azote, c'est davantage le secteur de l'agriculture qui est en cause (les processus de digestion des animaux d'élevage, mais aussi la fermentation et la décomposition de la matière organique émettent par exemple du méthane).

...qui entraîne un changement climatique caractérisé par un réchauffement global

La conséquence inévitable de l'accroissement des teneurs en GES dans l'atmosphère est un renforcement de l'effet de serre, caractérisé notamment par un réchauffement global des basses couches de l'atmosphère. On parle également de forçage radiatif positif pour désigner ce phénomène de réchauffement global. Jean-Marc Jancovici en s'appuyant sur le schéma du bilan radiatif de la Terre présenté en début de fiche (cf. Figure 1, p.13), le phénomène de forçage radiatif peut se résumer de la manière suivante : « quand on augmente la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, cela augmente son opacité au rayonnement terrestre, et donc le terme B (le rayonnement infrarouge terrestre qui parvient à s'échapper directement vers l'espace) diminue. Corrélativement le terme C [la part de rayonnement infrarouge terrestre « absorbé » par les GES, nda] augmente, ce qui conduit l'atmosphère à recevoir plus d'énergie. Elle rayonne donc plus, et le terme D [le rayonnement infrarouge réémis vers la surface terrestre, nda] augmente aussi. Le sol va donc recevoir une énergie accrue et sa température moyenne va monter » (Jancovici, 2002).

L'accroissement de température constaté depuis le début du XX^e siècle correspond en moyenne mondiale à environ 1°C, tandis que le niveau de la mer s'est élevé de 15 à 20 cm sur la même période. Ce réchauffement moyen n'est pas homogène, il concerne davantage certaines régions. Surtout, il est très rapide. Les modélisations du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) montrent que cette augmentation de la teneur en gaz à effet de serre devrait provoquer au cours du siècle à venir une augmentation moyenne des températures à la surface du globe allant de 1,8 à 4°C (GIEC, 2007 ; IPCC, 2018 - cf. Figure 4). Une telle évolution climatique entraînera des bouleversements écologiques mais aussi socio-économiques tels que l'humanité n'en a jamais connu sur une période aussi courte. La température moyenne devrait même dépasser les pics de la période interglaciaire précédente, lors de la phase dite de « super-interglaciaire » qui a eu lieu il y a 125.000 ans environ.

■ QUELLE EST LA VARIABLE DE CONTRÔLE RETENUE ?

Les scientifiques travaillant sur les limites planétaires ont proposé jusqu'à présent deux indicateurs complémentaires comme « variables de contrôle » concernant le changement climatique :

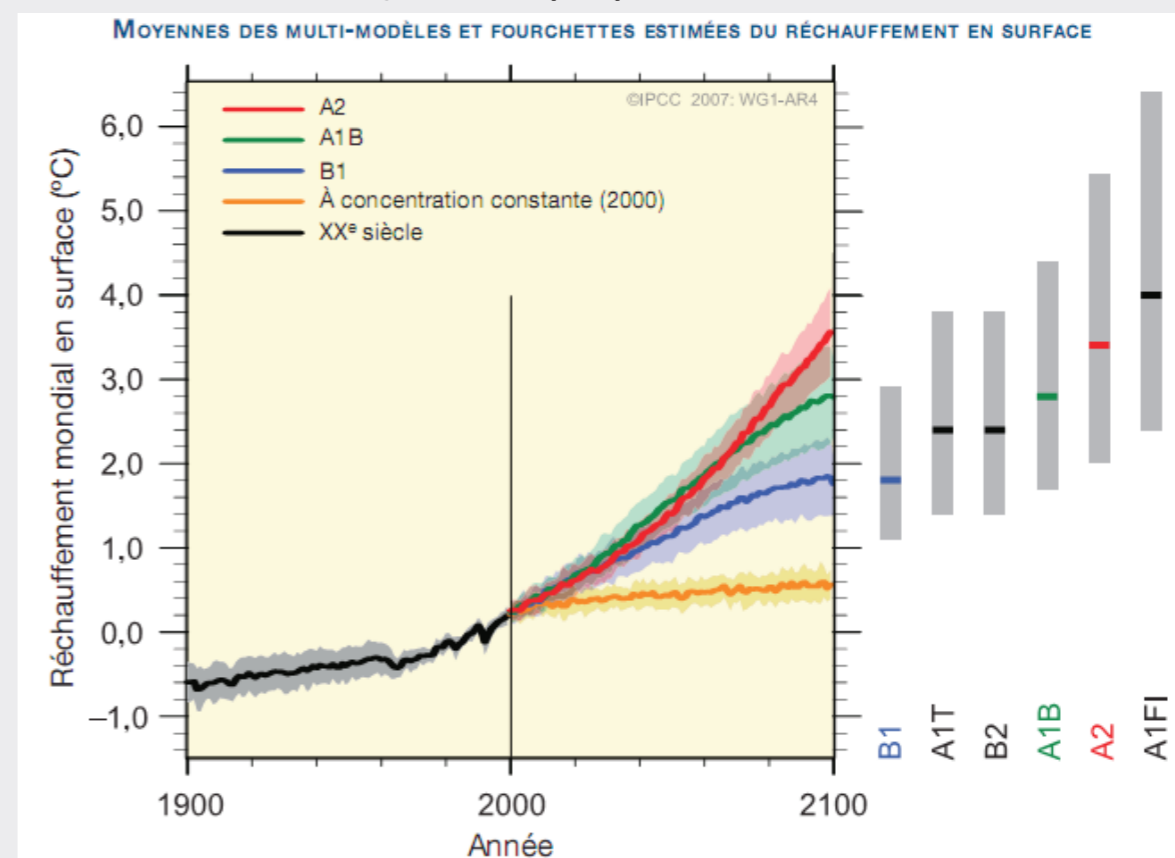


Plusieurs phénomènes naturels et anthropiques sont impliqués dans le changement climatique

La variabilité naturelle du climat est essentiellement liée aux variations du rayonnement solaire, mais son impact sur le réchauffement aujourd'hui constaté est marginal. L'essentiel du forçage radiatif constaté est donc lié à des phénomènes d'origine anthropique ; il résulte d'une balance entre, d'un côté, des phénomènes qui ont des effets refroidissants, comme par exemple la dispersion d'aérosols dans l'atmosphère (qui ont un effet négatif sur le forçage radiatif, c'est-à-dire un effet refroidissant) ; et, de l'autre côté, des phénomènes qui réchauffent

les basses couches de l'atmosphère, comme les émissions de GES (qui ont donc un effet positif sur le forçage radiatif). Le bilan penche aujourd'hui très nettement en faveur du renforcement du forçage radiatif, qui s'explique majoritairement par les émissions de GES, avec en tête les émissions de CO₂, suivi du méthane, des halocarbones (hydrofluorocarbures, perfluorocarbure, hexafluorure de soufre) et enfin du protoxyde d'azote (GIEC, 2007).

Figure 4 : Estimation des évolutions de températures moyennes à la surface du globe selon les principaux scénarios du GIEC (GIEC, 2007)



Commentaire : en noir et à gauche figure l'évolution des températures mondiales en surface au XX^e siècle. À droite et en couleur sont représentées les évolutions de la température moyenne du globe au cours du XXI^e siècle telles qu'elles sont modélisées par le GIEC en fonction de différents scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (A2, A1B, etc.) avec tout à droite le niveau de réchauffement estimé en 2100 et les marges d'incertitude figurées en grisé. La ligne orange figure un scénario de référence fictif, correspondant à une concentration constante équivalente à celle de l'an 2000.

- **La concentration de CO₂ dans l'atmosphère**, exprimée en parties par million, ou ppm (1 ppm = 1/1 000 000). Le CO₂ est choisi car il s'agit du principal gaz à effet de serre d'origine anthropique responsable du changement climatique.

- **Le forçage radiatif**, exprimé en W/m² : le forçage radiatif est défini par le GIEC comme « l'équilibre entre le rayonnement solaire entrant et les émissions de rayonnements infrarouges sortant de l'atmosphère. » Un bilan positif traduit un réchauffement de l'atmosphère. Le forçage radiatif permet de prendre en compte les concentrations de l'ensemble des gaz à effet de serre (contrairement à la concentration de CO₂ qui ne prend en compte que ce gaz là), ainsi que les autres changements pouvant affecter le bilan radiatif de la Terre (changements d'albédo, par exemple).

■ QUELLE EST LA FRONTIÈRE PLANÉTAIRE : 350 ppm CO₂ et +1 W/m²

Les limites et frontières pour ces deux indicateurs sont délicates à produire et se basent essentiellement sur le consensus politique qui s'est progressivement établi autour de l'objectif consistant à limiter le réchauffement global en dessous de la barre des +2°C en fin de XXI^e siècle par rapport à l'ère préindustrielle, les risques d'emballement climatique devenant importants au-delà de ce seuil du fait de possibles rétroactions positives et autres effets en chaîne difficilement modélisables.

On notera au passage que le dernier rapport du GIEC (2018) montre que les niveaux des différents risques associés à une augmentation de température moyenne globale (mise en danger d'écosystèmes, événements climatiques extrêmes, disparition des barrières de coraux, inondations des côtes littorales, par exemple) sont bien plus élevés pour une augmentation de température de 2°C que pour une augmentation de 1,5°C, ce qui suggère une plus grande prudence par rapport aux seuils de température (et donc aux profils d'émissions) si l'humanité souhaite limiter les risques associés au changement climatique.

Pour le CO₂, une valeur seuil de 350 ppm a été proposée. La littérature scientifique montre par exemple que par le passé la glace des pôles semble avoir disparu de la surface de la Terre aux alentours de 450 ppm de CO₂ dans l'atmosphère (+/-100 ppm), suggérant une zone de danger pour l'équilibre planétaire entre 350 et 550 ppm – voire probablement entre 350 et 450 ppm (revu par Steffen et coll., 2015).

Pour le forçage radiatif, une valeur d'1 W/m² au-delà du seuil préindustriel est proposée.

■ QUELLE EST LA VALEUR ACTUELLE : 400 ppm CO₂ et +2,3 W/m²

Les concentrations en CO₂ dans l'atmosphère étaient estimées à 399 ppm lors de la dernière publication sur les limites planétaires (Steffen et al., 2015). Les mesures de référence de l'observatoire de Mauna Loa (Hawaï) ont toutefois montré depuis un dépassement de la barre des 410 ppm au printemps 2017, suggérant des moyennes annualisées supérieures à 400 ppm.

Le forçage radiatif est quant à lui estimé à +2,3 W/m², soit très au-dessus de la limite de risque accru (mais aucune limite de risque élevé n'est mentionnée pour cet indicateur).

Rockström et ses collègues en concluent que le climat contemporain « est en train de sortir de l'enveloppe de la variabilité de l'Holocène, accroissant le risque de changement climatique dangereux. »

Quel lien avec les autres processus planétaires ?

Une particularité du changement climatique est qu'il entretient des relations avec quasiment toutes les autres frontières environnementales planétaires.

Le changement climatique est par exemple directement lié à l'**acidification des océans**, ce dernier étant dû majoritairement à la séquestration par les océans d'environ un tiers des émissions de CO₂ d'origine anthropique – ce qui jusqu'à présent permet de limiter le réchauffement du climat.

Du fait de sa rapidité, il est d'ores et déjà devenu une cause majeure de pression sur l'intégrité de la biosphère et l'érosion de la **biodiversité** – les écosystèmes et les espèces ayant parfois des difficultés à s'adapter à ce changement rapide.

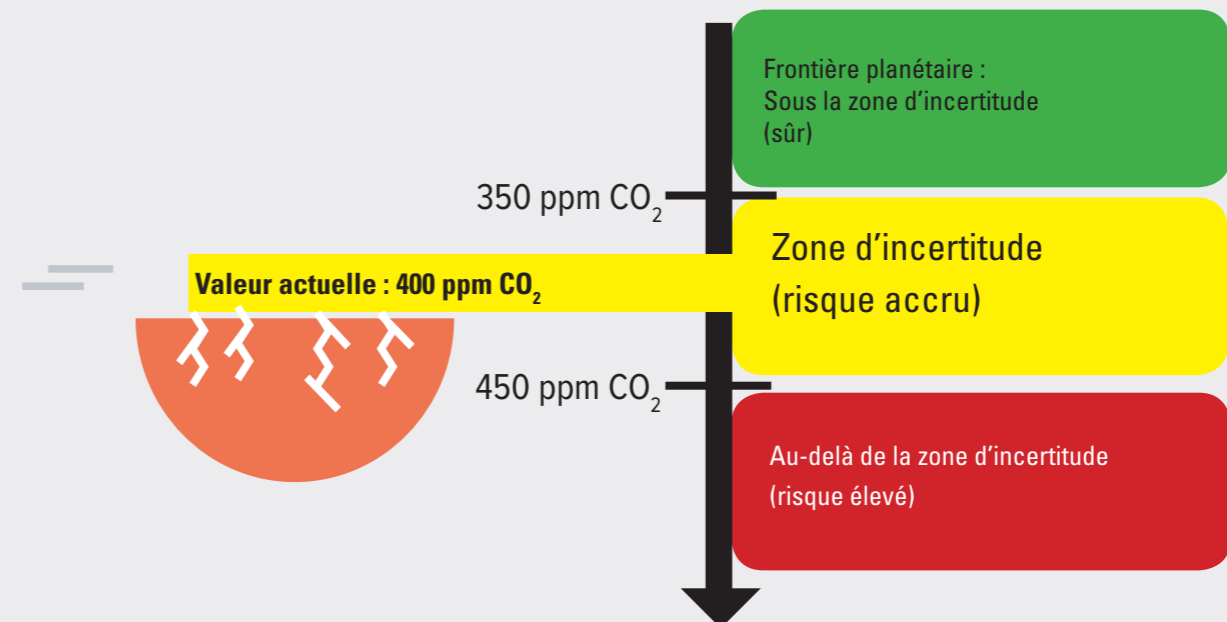
Par ailleurs, le **changement d'affectation des sols** impacte le changement climatique de différentes manières : il modifie les capacités de séquestration du carbone dans la biomasse et, en cas de déforestation notamment, il génère un relargage de CO₂ dans l'atmosphère qui accroît le changement climatique.

La **perturbation du cycle de l'azote** aggrave également le changement climatique, notamment du fait de l'accroissement de la production de protoxyde d'azote dans l'atmosphère.

L'**ozone stratosphérique** joue un rôle refroidissant dans le bilan radiatif de la Terre et certains gaz responsables de la destruction de la couche d'ozone, comme les CFC, sont également de puissants gaz à effet de serre, ce qui accroît encore la nécessité d'en supprimer l'usage. En revanche certains gaz de substitution des CFC, comme les HFC (hydrofluorocarbures), sont également des gaz à effet de serre et pourraient devenir un facteur non négligeable de changement climatique à l'avenir. (WMO, 2018)

Paradoxalement, l'accroissement de la **charge atmosphérique en aérosols** a un effet refroidissant sur les basses couches de l'atmosphère, ce qui tend à modérer l'impact des gaz à effet de serre... mais au prix d'impacts sanitaires et environnementaux non négligeables.

Enfin, le changement climatique a des effets sur cycle de l'eau et le régime des perturbations, qui pourrait avoir localement des effets sur la **disponibilité en eau douce**.





QUE PEUT-ON FAIRE ?

Respecter les engagements internationaux et diviser par 5 les émissions de la France

Bien que le risque lié à l'accroissement de l'effet de serre soit suspecté depuis le XIX^e siècle, l'alerte scientifique n'a été lancée qu'à partir des années 1980. La communauté internationale s'est alors mobilisée, mais plus lentement que pour l'enjeu de la couche d'ozone. La signature en 1992 de la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC) a donné lieu à partir de 1994 à l'organisation annuelle de conférences des parties (COP), qui ont abouti en 1997 à la signature du protocole de Kyoto. Considéré comme une première étape, le protocole a trouvé une suite à travers l'Accord de Paris, qui formule un objectif ambitieux : le maintien du réchauffement climatique « *en dessous de 2°C par rapport aux niveaux préindustriels et en poursuivant l'action menée pour limiter l'élévation de la température à 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels.* » Pour y parvenir il préconise d'atteindre un bilan carbone mondial neutre dans le courant de la seconde moitié du siècle. Le cadre d'engagement est toutefois non contraignant, basé sur des engagements volontaires qui devront être réactualisés régulièrement. Dans l'état actuel, les engagements ne permettent pas le respect de l'objectif de +1,5°C et nous installent sur un scénario +3 à +4°C en fin de siècle.

Compte-tenu des potentialités de séquestration du carbone, l'objectif de neutralité carbone suppose de converger au niveau mondial à un niveau d'émissions inférieur à 1,5 t.CO₂eq/hab, soit pour la France une division par 5 de ses émissions actuelles de GES. Pour un pays comme les USA, cela supposerait une division de ses émissions par plus de 10. En France, la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) décline l'objectif de l'Accord de Paris à l'échelle nationale et fixe un objectif de neutralité carbone pour la France à l'horizon 2050, ce qui passe par plusieurs leviers d'action (MTES, 2018) :

Des transports décarbonés

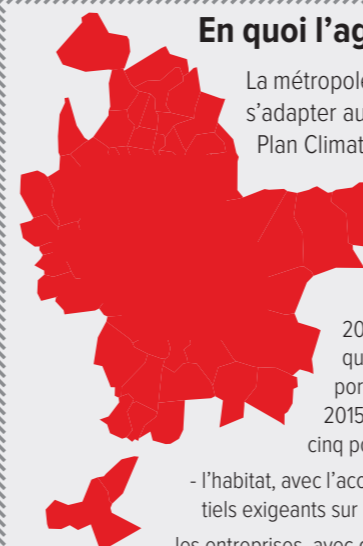
Le transport est le premier secteur émetteur de GES en France. La SNBC prévoit une décarbonation quasi complète du secteur des transports en 30 ans, soit par passage à des motorisations électriques, soit par passage au biocarburant et au biogaz (seuls le transport aérien et les soutes maritimes internationales devront utiliser encore des énergies fossiles à cette date). Cinq leviers sont mobilisés : décarbonation de l'énergie consommée par les véhicules ; performance énergétique des véhicules afin de limiter les consommations énergétiques ; maîtrise de la croissance de la demande ; report modal et optimisation de l'utilisation des véhicules pour le transport de voyageurs et de marchandises.

Des bâtiments rénovés et efficaces

Le bâtiment est le second poste émetteur de GES, la SNBC vise d'ici 30 ans un parc entièrement rénové et à 100 % aux normes BBC (bâtiments basse consommation), ce qui suppose un effort de rénovation énergétique considérable. Le mix énergétique dédié au chauffage devra également être entièrement décarboné, avec notamment un recours important aux énergies renouvelables, aux pompes à chaleur et aux réseaux de chaleur urbains. Il faudra également des comportements plus économes, notamment une baisse de la température de chauffe d'environ 1°C.

Une agriculture durable et économe en énergie

La SNBC prévoit une division par deux des émissions du secteur agricole à l'horizon 2050. Ce secteur se caractérise par une majorité d'émissions non énergétiques (CH₄ et N₂O). L'objectif suppose des techniques de culture moins émettrices (cultures de légumineuses, optimisation du cycle de l'azote, agroforesterie, agriculture biologique, élevage à l'herbe, etc.) et une modi-



En quoi l'agglomération lyonnaise est-elle concernée ?

La métropole de Lyon participe à l'effort de réduction des émissions de GES, mais elle va également devoir s'adapter au changement climatique. Ces deux volets de l'action sont aujourd'hui pris en compte dans le Plan Climat Air-Energie Territorial (PCAET).

Une métropole économe en énergie et de plus en plus décarbonée

Comme c'est le cas pour la plupart des territoires urbains, les émissions de la métropole sont presque intégralement liées à ses consommations d'énergies fossiles, qui se répartissent assez équitablement entre entreprises, transport et habitat-tertiaire. La première phase du PCAET initiée à la fin des années 2000 a permis de réduire les émissions de GES du territoire de 16 % entre 2000 et 2015, et ce alors même que la population augmentait de 13 %, avec un effort plus marqué dans l'industrie (-22 %) que dans le transport (-10 %). Ramenées à l'habitant, ces émissions de GES sont en dessous de la moyenne française, avec en 2015 5 t.CO₂eq hab/an (Grand Lyon, 2019). Les actions du PCAET abordent tous les secteurs d'émission, avec cinq points d'entrée :

- l'habitat, avec l'accompagnement à la rénovation du parc social et privé (Ecoréno'V), mais aussi la mise en place de référentiels exigeants sur l'habitat et le tertiaire neufs ;
- les entreprises, avec des aides à la transition pour les TPE/PME, la rénovation du parc tertiaire, le développement d'une filière bâtiments durables, le développement des smart grids ou encore l'engagement des industries les plus émettrices du territoire à réduire leurs émissions de GES ;
- l'énergie, avec le développement des réseaux de chaleur et de la biomasse, mais aussi de la filière bois et des autres énergies renouvelables ;
- les déplacements, avec une politique active en faveur des modes actifs, du covoiturage et des transports en commun, mais aussi des actions visant à réduire la place de la voiture (baisse des vitesses, zones à faibles émissions, etc.) ;
- des actions transversales, comme l'accompagnement au changement de comportement des habitants, l'exemplarité de la Métropole ou encore la mise en œuvre de documents d'urbanisme cohérents avec l'objectif de division par quatre des émissions à l'horizon 2050.

Une métropole qui s'adapte au changement climatique

La métropole est particulièrement sensible à l'évolution du climat et doit d'ores et déjà prévoir son adaptation. Selon certaines estimations, le climat en 2100 pourrait être aussi chaud qu'à Madrid voire Alger. Cela passe par des actions de préservation de la ressource en eau, de lutte contre l'effet des canicules en zones urbaines (îlots de chaleur urbain), mais aussi l'adaptation des pratiques agricoles ou encore l'accompagnement des populations.

fication des comportements alimentaires. L'efficacité énergétique devra permettre de diviser par deux les consommations du secteur, complétée par une électrification des outils de production lorsque c'est possible.

Des industries plus écologiques

Le secteur industriel devra miser sur une meilleure efficacité énergétique et une électrification des procédés, ainsi que la mise en œuvre de procédés d'économie circulaire permettant d'optimiser l'usage des matières premières et de leur empreinte carbone.

Une production d'énergie massivement décarbonée

D'ici 30 ans, le scénario de la SNBC suppose que le secteur énergétique est quasi-complètement décarboné : il est composé « de chaleur renouvelable et de récupération (90 à 100 TWh), de biomasse (400 à 450 TWh) et d'électricité décarbonée (solde restant de 600 à 650 TWh, dont une partie utilisée pour des conversions vers d'autres vecteurs d'énergie finale: hydrogène, gaz...). En 2050, la production de gaz renouvelable se situe dans une fourchette de 195 à 295 TWh. La part du gaz utilisé dans le secteur résidentiel et tertiaire décroît fortement. Les technologies de capture et stockage du carbone (CSC) sont également mobilisées, de manière prudente, dans le scénario de référence. » (MTES, 2018)

Le scénario de la SNBC présente bien entendu des limites, notamment parce qu'il n'explique pas comment seront menées les immenses mutations nécessaires à cette transition, que ce soit en termes de changement de comportement et de modes de vie, mais aussi en matière de stratégies économiques et industrielles. Par ailleurs, ces efforts considérables de réduction des émissions devront s'accompagner d'une adaptation de la société au changement climatique, qui aura malgré tout des effets sur de nombreux territoires et secteurs d'activités.

BIBLIOGRAPHIE

- GIEC, 2007. Résumé à l'intention des décideurs. In: « Changements climatiques 2007 : Les éléments scientifiques ». Contribution au Groupe de travail I au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor et H.L. Miller (éds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK et New York, NY, USA
- Grand Lyon, 2019. « L'observatoire métropolitain du développement durable. Où en est le territoire de la métropole de Lyon ? », Grand Lyon, Agence d'urbanisme urbalyon.
- IPCC. 2018. « Global warming on 1.5°C ». 2018. WMO, UNEP, IPCC, Suisse. – http://report.ipcc.ch/sr15/pdf/sr15_spm_final.pdf
- Jancovici, 2002. « L'avenir climatique », Le Seuil, Paris.
- MTES, 2018. « Projet de Stratégie Nationale Bas-carbone. La transition écologique et solidaire vers la neutralité carbone ». Version projet, décembre 2018. – <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/Projet%20strategie%20nationale%20bas%20carbone.pdf>



L'ACIDIFICATION DES OCÉANS

■ QU'EST-CE QUE C'EST ?

L'océan, un milieu alcalin...

L'acidité d'un liquide est déterminée par sa concentration moyenne en ions hydrogène (H⁺). Elle est généralement mesurée selon l'échelle dite de potentiel hydrogène (pH) qui s'étend de 0 à 14 : un liquide est ainsi considéré comme neutre si son pH est égal à la valeur médiane de 7 ; il est en revanche acide si son pH est inférieur à cette valeur et il est alcalin ou basique si son pH est supérieur à 7. L'eau pure a un pH neutre tandis que l'eau de mer, dont la composition physico-chimique est différente, a un pH d'environ 8,2 : elle est donc alcaline.

Il est important de noter que l'échelle de pH est logarithmique, c'est à dire qu'un liquide de pH 7 est 10 fois plus acide qu'un liquide de pH 8 (ou encore, sa concentration en ions H⁺ est 10 fois supérieure).

...favorable à l'épanouissement de la vie marine

Le pH des océans a pu varier par le passé, en fonction notamment du climat et des cycles biogéochimiques – en particulier du fait des échanges entre l'océan et l'atmosphère. Ce pH est toutefois relativement stable puisqu'il oscille depuis environ 20 millions d'années entre 8,1 et 8,3 pH. Le caractère alcalin de l'océan a permis durant cette période à de nombreux organismes marins de s'épanouir, comme par exemple les coraux ou les organismes marins à coquilles ou à squelettes calcaires, particulièrement sensibles aux variations de pH. La stabilité du pH est donc un déterminant important des conditions de vie en milieu océanique.

■ QUEL EST LE PROBLÈME ?

Une acidification déjà largement entamée

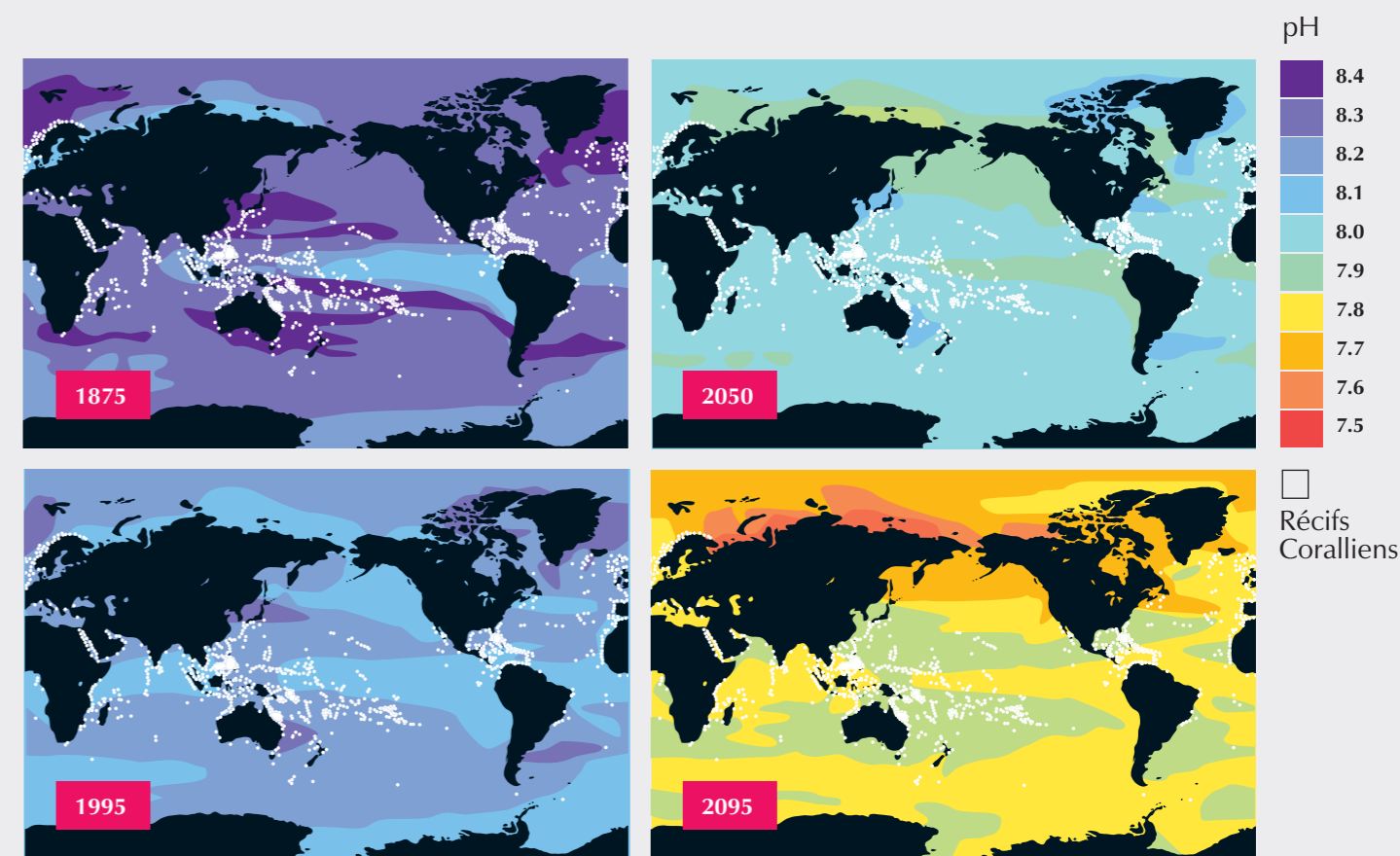
La tendance constatée depuis plusieurs décennies consiste en une acidification des eaux de surface des océans, c'est-à-dire une augmentation d'ions hydrogènes H⁺ (cf. Figure 1). Il faut noter au passage que l'acidification désigne non pas le passage à un niveau de pH considéré comme acide (<7 pH) mais le phénomène d'accroissement de l'acidité dans les eaux océaniques : ces eaux restent alcalines mais, du XVIII^e siècle jusqu'aux années 1990, le pH des océans est passé en moyenne de 8,25 à 8,14. Cette diminution apparemment modeste de 0,11 pH traduit en réalité (du fait de l'échelle logarithmique utilisée) un accroissement de 30 % de l'acidité des océans.

Surtout, ce changement est extrêmement rapide et tend à s'accélérer ; plusieurs scénarios (Feely et al., 2009) prévoient qu'au rythme actuel, l'acidité des océans pourrait plus que doubler d'ici à 2050 (-0,2 pH) et peut-être même tripler à l'horizon 2100 (- 0,4 pH) : soit un phénomène plus marqué, mais aussi bien plus rapide que tous ceux constatés au cours des 20 derniers millions d'années. Ce phénomène d'acidification s'avère par ailleurs irréversible à des échelles de temps d'au moins plusieurs dizaines de milliers d'années.

L'océan subit les perturbations du cycle du carbone...

Cette acidification est en majorité liée à la perturbation du cycle du carbone, déjà en cause dans le changement climatique. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle l'acidification des océans est également parfois désignée comme « l'autre problème du CO₂ » (Doney et al., 2009). Aujourd'hui encore, l'océan est le principal puits de carbone naturel, grâce à deux phé-

Figure 1 : Estimation du pH moyen des eaux de surface : passé, présent et avenir (Feely et al., 2009)



Source d'après Feely et al., Oceanography (2009)

nomènes : la captation du gaz carbonique de l'atmosphère par les organismes marins (notamment les phytoplanctons) et, surtout, la dissolution du CO₂ dans les eaux océaniques. Depuis le début de la révolution industrielle et le relargage massif de CO₂ d'origine anthropique dans l'atmosphère, on estime qu'environ 30 à 40 % de ce gaz carbonique d'origine humaine a été dissous dans les océans. Ce phénomène permet de réduire l'effet de serre, mais il entraîne une modification de la composition physico-chimique des océans. Le CO₂ se combine en effet avec les molécules d'eau pour former des molécules d'acide carbonique, instables, qui se dissocient alors pour former des ions bicarbonate et des ions H⁺, ces derniers étant directement responsables de l'acidification (CGDD, 2011). Pour le dire simplement, l'absorption de CO₂ atmosphérique par les océans entraîne une réaction chimique qui accroît l'acidité des océans.

...et cette acidification a des effets en chaîne sur le vivant

Comme nous l'avons évoqué, l'accroissement du CO₂ dans les océans entraîne une augmentation de la concentration d'ions H⁺ (acidité) mais aussi – et c'est important – une baisse de la concentration d'ions carbonate (mobilisés pour la production d'ions bicarbonate). Or ces derniers sont indispensables pour de très nombreux organismes vivants de la chaîne alimentaire des océans, en particulier les organismes calcifiés, c'est à dire ceux qui disposent d'une coquille (coquillages, mollusques), d'une carapace (crustacés) ou encore d'un squelette en calcaire (certains planctons et les coraux). La concentration plus faible en ions carbonate peut donc nuire à la calcification et rendre ces organismes plus fragiles, comme cela a déjà été démontré en laboratoire mais aussi dans certaines régions du monde particulièrement concernées par le phénomène d'acidification. À un certain niveau, cette calcification peut même devenir impossible.

Enfin, d'autres organismes sont quant à eux directement sensibles à l'acidification en tant que telle : modification des comportements des poissons, diminution de la photosynthèse amenant à une baisse de la croissance et des capacités de reproduction (Mora et al., 2013).

Les impacts sur les océans sont difficiles à anticiper, mais des effets en cascade sont à redouter, aussi bien pour les écosystèmes que pour les activités humaines (Mora et al., 2013 ; Magnan et al., 2016). Par exemple, certains organismes à la base de la chaîne alimentaire comme les ptéropodes (de minuscules mollusques) sont d'ores et déjà affectés dans certaines régions du monde. Combinée au réchauffement des eaux, l'acidification des océans menace également les récifs coralliens qui constituent des réservoirs considérables de biodiversité. Au contraire, certains organismes pourraient profiter de ce changement (par exemple certaines algues). Les écosystèmes marins vont donc probablement considérablement changer et impacter les activités humaines liées à la vie marine (pêche, aquaculture, conchyliculture, etc.).

Enfin, l'acidification réduit les capacités de séquestration du carbone atmosphérique, ce qui signifie que les quantités de CO₂ transférées de l'atmosphère vers les océans vont probablement décroître au cours des décennies à venir, aggravant d'autant le changement climatique.

■ QUELLE EST LA VARIABLE DE CONTRÔLE RETENUE ?

Comme nous l'avons vu, l'acidification des océans réduit la capacité de calcification de certains organismes marins. Cette capacité est déterminée par le degré de saturation de l'eau de mer en carbonates de calcium – plus précisément les calcites et les aragonites, qui sont les carbonates de calcium à partir desquels ces organismes produisent leurs coquilles ou leurs squelettes. En deçà d'un certain seuil (par exemple en eaux profondes), l'eau de mer est dite sous-saturée en carbonate de calcium : cela signifie que les carbonates de calcium se dissolvent, rendant impossible la calcification pour les organismes marins.

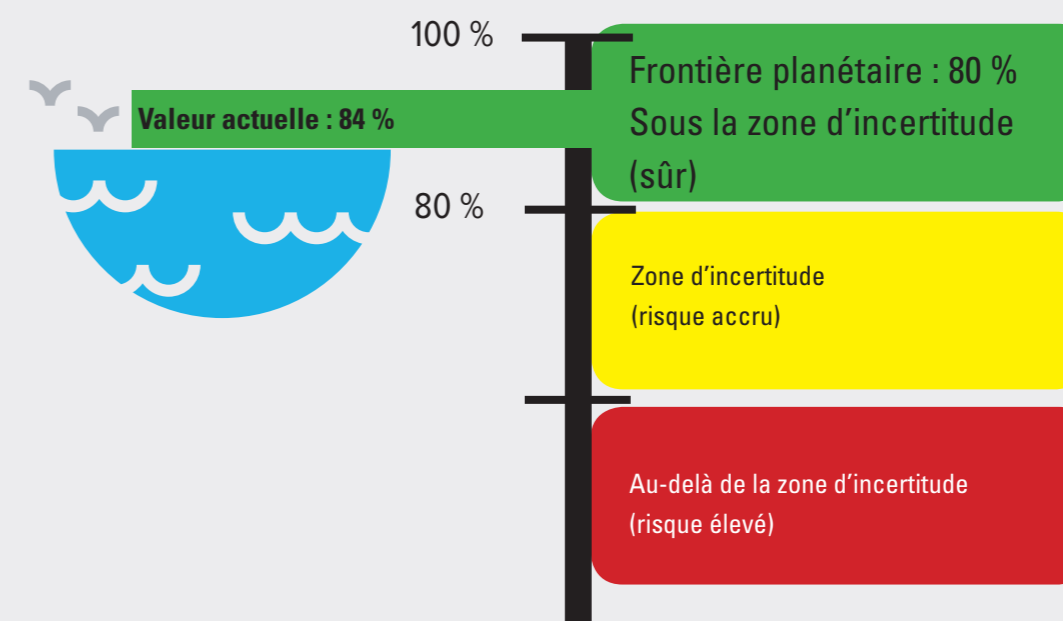
Les scientifiques ont retenu comme indicateur clé le degré de saturation de l'eau de mer de surface en aragonites, l'un des deux principaux types de carbonates de calcium produits par les organismes marins. Lorsqu'il est inférieur à 1, cela signifie que l'eau de mer est sous-saturée : l'aragonite se dissout et les organismes marins ne peuvent plus opérer de calcification.

Quel lien avec les autres processus planétaires ?

L'acidification des océans est liée à plusieurs autres limites planétaires.

Du fait de son origine (la perturbation du cycle du carbone) elle est particulièrement liée au changement climatique : les océans séquestrent une partie du CO₂ présent en surplus dans l'atmosphère, ce qui limite le **changement climatique** mais génère une acidification de l'eau de mer. Certains indices tendent à montrer que les capacités de séquestration physique du carbone atmosphérique par les océans sont en baisse, du fait notamment du réchauffement des eaux qui limitent les capacités de dissolution du CO₂ : cela pourrait alors renforcer le changement climatique (risque de rétroaction positive). L'acidification a également des effets potentiellement dévastateurs en termes de **biodiversité** puisque certains organismes à la base de la chaîne alimentaire sont directement menacés, ainsi que d'autres comme les coraux qui forment un milieu particulièrement riche en biodiversité.

De manière plus marginale, l'acidification est également pour partie liée aux perturbations du **cycle de l'azote** et du **phosphore**. Par exemple, la migration de l'azote issu de l'agriculture dans les cours d'eau finit par se déverser dans les océans où il provoque la prolifération d'algues vertes et de phytoplanctons qui réduisent la quantité d'oxygène et accroissent celle du CO₂, aggravant ainsi l'acidification des océans.



■ QUELLE EST LA FRONTIÈRE PLANÉTAIRE ? 80%

80 % du niveau de saturation en aragonites de l'ère préindustrielle

Les effets potentiellement irréversibles de l'acidification des océans apparaîtront bien avant que l'eau de mer de surface soit complètement sous-saturée en aragonites et que les organismes marins ne puissent plus opérer de calcification. C'est la raison pour laquelle la frontière proposée ne correspond pas au seuil de saturation de l'aragonite. Faute de données plus précises, les scientifiques se sont entendus pour fixer une frontière correspondant à 80 % du degré de saturation de l'eau de mer en aragonites constaté en moyenne dans les océans lors de l'ère préindustrielle.

■ QUELLE EST LA VALEUR ACTUELLE ? 84%

Depuis l'ère préindustrielle, à cause de l'acidification des eaux, le niveau de saturation en aragonites a chuté, ce qui signifie que la capacité de calcification des organismes marins est moindre. La valeur actuellement constatée équivaut à 84 % de celle de l'ère préindustrielle. Soit légèrement en deçà de la frontière planétaire globale proposée.



QUE PEUT-ON FAIRE ?

Avant tout prévenir... c'est-à-dire réduire les émissions de CO₂ dans l'atmosphère !

Le principal levier d'action consiste à réduire les émissions de CO₂ dans l'atmosphère, qui sont la cause principale de l'acidification des océans. De ce point de vue, les mesures à mettre en œuvre recoupent très largement celles qui visent à lutter contre le changement climatique, puisque le CO₂ est le plus important gaz à effet de serre d'origine anthropique. La réduction drastique de l'usage des énergies fossiles est de ce point de vue une priorité. Les modélisations menées sur la base des scénarios du GIEC estiment que le respect des Accords de Paris ne suffirait pas forcément à rester sous la valeur limite de 80 %, mais elle nous permettrait de limiter les effets les plus redoutables de l'acidification (mais aussi du réchauffement) des océans (Markan et al., 2016).

Et favoriser la résilience des écosystèmes et des sociétés menacées

Même si la réduction des émissions de CO₂ arrive en tête des actions à mener, la littérature identifie au moins trois autres leviers possibles d'action afin de se prémunir des effets les plus néfastes de l'acidification des océans (Billé et al., 2013) :

- 1) Réduire les effets combinés en protégeant les écosystèmes marins et côtiers des autres formes de pression humaine : création de réserves marines, régulation des prélèvements des ressources halieutiques, réduction des pollutions côtières, etc.
- 2) Adapter les sociétés aux changements en cours : par exemple, délaissier les activités économiques sensibles à l'acidification des océans, comme la conchyliculture, et développer les activités plus résilientes face à ce risque.
- 3) Réparer lorsque possible les écosystèmes endommagés : plantation de mangroves, élevage de coraux, reconstruction/consolidation des plages, etc.

Jean-Pierre Gattuso en conclut que, « si on agit de manière efficace et suffisamment tôt, nous pouvons contenir cette évolution, stopper le réchauffement et l'acidification. Il faudra ensuite quelques centaines d'années pour un retour à la normale. » (Gattuso, 2018)



BIBLIOGRAPHIE

- Billé R., Kelly R., Biastoch A., Harrould-Kolieb E., Herr D., Joos F., Kroecker K., Laffoley D., Oschlies A., Gattuso J.-P., 2013. « Taking action against ocean acidification: a review of management and policy options. » *Environmental Management* 52 (4), pp. 761-779.
- CGDD – Commissariat Général au Développement Durable, 2011. « Acidification de l'océan », in *Études et documents*, n°55, octobre 2011, pp. 47-50. - <https://www.yumpu.com/fr/document/read/12337285/impacts-a-long-terme-du-changement-climatique-sur-le-littoral>
- Doney et al., 2009. « Ocean Acidification : The Other CO₂ Problem » *Annual Review of Marine Science*, vol. 1, pp. 169-192. - <https://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev.marine.010908.163834>
- Feely et al., 2009. « Ocean Acidification. » *Oceanography*, vol. 22., n°4, pp. 37-47. - https://tos.org/oceanography/assets/docs/22-4_feely.pdf
- Gattuso J.-P., Magnan A., Billé R., Cheung W.W.L., Howes E.L., Joos F., Allemand D., Bopp L., Cooley S., Eakin M., Hoegh-Guldberg O., Kelly R.P., Pörtner H.-O., Rogers A., Baxter J.M., Laffoley D., Osborn D., Rankovic A., Rochette J., Sumaila U.R., Treyer S., Turley C., 2015. « Contrasting Futures for Ocean and Society from Different Anthropogenic CO₂ Emissions Scenarios » *Science*, 349 (6243). DOI: 10.1126/science.aac4722.
- Gattuso J.-P. 2018. « Les impacts de l'acidification des océans aggravent ceux de son réchauffement », mis en ligne sur le site de Réseau Action Climat, le 19-12-2018. - <https://reseauactionclimat.org/impacts-acidification-océans-aggravent-rechauffement/>
- Magnan A. K., Gattuso J.-P., 2016. « The need for fighting against ocean change ». *Ocean Newsletter*, n° 393.
- Magnan A.K., Colombier M., Billé R., Joos F., Hoegh-Guldberg O., Pörtner H.-O., Waisman H., Spencer T., Gattuso J.-P. 2016. « Implications of the Paris agreement for the ocean. » *Nature Climate Change* 16(8): 732-734. DOI: 10.1038/nclimate3038.
- Mora et al., 2013. « Biotic and Human Vulnerability to Projected Changes in Ocean Biogeochemistry over the 21st Century. » *Plos Biology*, 11(10): e1001682. - <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3797030/>

LES PERTURBATIONS DU CYCLE DE L'AZOTE



■ QU'EST-CE QUE C'EST ?

L'azote est hyper abondant dans l'atmosphère et vital pour la biosphère...

L'azote (plus précisément le diazote : N_2) est particulièrement abondant dans l'air que nous respirons. 78 % de l'atmosphère est en effet composé d'azote, contre 21 % d'oxygène, le reste étant constitué de gaz plus rares.

Élément principal de l'atmosphère, l'azote joue également un rôle majeur dans la biosphère : c'est une composante des acides aminés (protéines) et des acides nucléiques (ADN, ARN, etc.) ; mais c'est aussi un élément très important de la croissance des végétaux. L'azote est donc indispensable à l'ensemble du cycle du vivant, et la productivité de la biomasse dépend en grande partie de la capacité des plantes à fixer cet élément.

...mais il est très difficile d'accès pour le vivant !

Malheureusement, l'azote de l'atmosphère (N_2) est inactif, c'est à dire qu'il n'est pas directement assimilable par les plantes. Pour devenir réactif, cet azote doit subir une transformation sous forme d'ammonium (NH_4^+) ou plus encore de nitrates (NO_3^-). Sous cette forme réactive, les végétaux peuvent alors assimiler l'azote grâce à leurs systèmes racinaires. Mais dans la nature, cette transformation de l'azote (également appelée fixation) ne peut s'opérer que de deux manières :

- soit, marginalement, de manière atmosphérique par le biais des orages ;
- soit, majoritairement, de manière biologique, par le biais de bactéries dites « nitrifiantes » qui disposent de cette capacité à transformer l'azote de l'atmosphère en nitrates (NO_3^-) ou en ammonium (NH_4^+). Ces bactéries nitrifiantes sont présentes dans l'eau et le sol, en particulier dans les racines de certaines plantes telles les légumineuses.

Un cycle naturel en équilibre

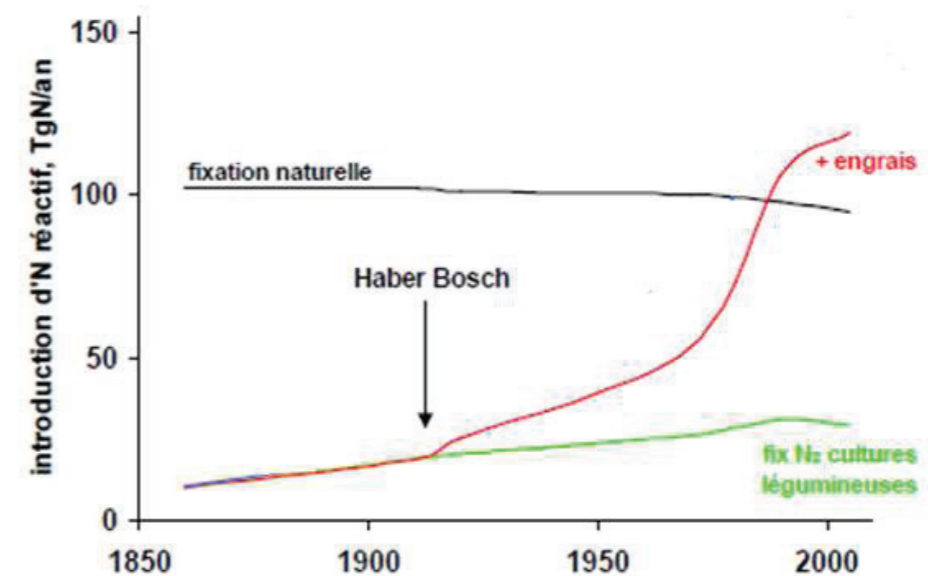
Une fois assimilé par les plantes, l'azote va se répandre dans toute la chaîne alimentaire, dont il ressortira dans les urines ou les matières fécales des animaux (y compris ceux des humains), mais aussi dans les organismes végétaux ou animaux en décomposition.

Ces résidus d'azote organique vont alors connaître deux transformations possibles :

- soit les organismes décomposeurs présents dans le sol vont retransformer cet azote organique en azote minéral (NO_3^- ou NH_4^+), qui sera à nouveau rendu assimilable par les plantes ;
- soit, en l'absence d'oxygène, certaines bactéries dites « dénitrifiantes » vont transformer les molécules d'azote présentes en surplus dans le sol pour le retransformer en diazote (N_2) et, marginalement, en protoxyde d'azote (N_2O) qui vont alors rejoindre l'immense stock de l'atmosphère.

Figure 1 : le cycle le plus perturbé

Le cycle de l'azote est le cycle biogéochimique le plus perturbé. Dès 1924, soit trois quarts de siècle avant l'invention du terme anthropocène, Alfred Lotka note que l'extraordinaire développement de l'industrie de l'azote « représente rien moins que l'avènement d'une nouvelle ère dans l'histoire de l'humanité, une nouvelle époque planétaire. Dans le court laps de temps d'une douzaine d'années – en un instant géologiquement parlant – l'homme a initié des transformations d'un ordre de grandeur comparable aux processus planétaires ». (cité par Esculier, 2016 – le graphique est tiré de la même source)



■ QUEL EST LE PROBLÈME ?

Un doublement de la quantité d'azote réactif dans la biosphère

Comprenant le rôle fondamental de l'azote dans la croissance des plantes, les agronomes ont rapidement réalisé l'intérêt qu'il y aurait à s'émanciper des processus naturels de fixation afin de produire artificiellement l'azote réactif (nitrate ou ammonium). Au tournant du vingtième siècle, plusieurs processus – comme le procédé Haber-Bosch – sont découverts, permettant de produire de manière industrielle des engrais minéraux azotés dont l'usage de plus en plus intensif va alors entraîner un accroissement notable de la productivité agricole. Depuis la révolution industrielle, la quantité d'azote contenue dans la biosphère a ainsi considérablement augmenté, au point que les activités humaines produisent aujourd'hui au niveau mondial davantage d'azote réactif que tous les processus naturels (cf. Figure 1, p.29). Dans certaines régions comme en Europe, les apports anthropogéniques d'azote réactif sont cinq fois supérieurs aux apports naturels ! En France, par exemple, entre 80 et 100 kg d'engrais azotés sont épandus chaque année par hectare cultivé, générant un surplus d'azote de 32 kg N/ha. (CGDD, 2013).

...générant des effets en cascade

Le problème majeur tient au fait que les capacités de la biosphère à séquestrer ces flux d'azote sont limitées. En effet, la majorité de l'azote réactif injecté dans la nature n'est en réalité pas absorbé par les plantes. Et comme les capacités des bactéries dénitrifiantes sont limitées, cet azote migre alors sous différentes formes dans les sols, dans les nappes phréatiques, dans les aquifères ou même dans l'atmosphère (cf. Figure 2). Autant de milieux où sa présence est alors source de nombreuses pollutions, par exemple :

- **La pollution des nappes phréatiques** : à partir d'un certain niveau de concentration, la présence de nitrates dans les nappes phréatiques rend celles-ci impropres à un usage destiné à l'eau potable.
- **L'eutrophisation des écosystèmes aquatiques** : l'accroissement des concentrations d'azote dans les milieux aquatiques (cours d'eau, lacs, zones côtières et océans) entraîne une eutrophisation de ces écosystèmes, c'est à dire une croissance de la production végétale (algues, plantes) qui requiert une consommation accrue d'oxygène pouvant aboutir à l'asphyxie de l'écosystème.
- **L'accroissement des émissions d'oxydes d'azote** : l'accumulation d'azote dans les écosystèmes est dans certains cas limitée par une activité plus intense des bactéries dénitrifiantes, dont le revers est un relargage accru dans l'atmosphère de diazote, mais aussi de protoxyde d'azote (N_2O) : un gaz à effet de serre dont le potentiel de réchauffement global est près de 300 fois supérieur à celui du CO_2 .

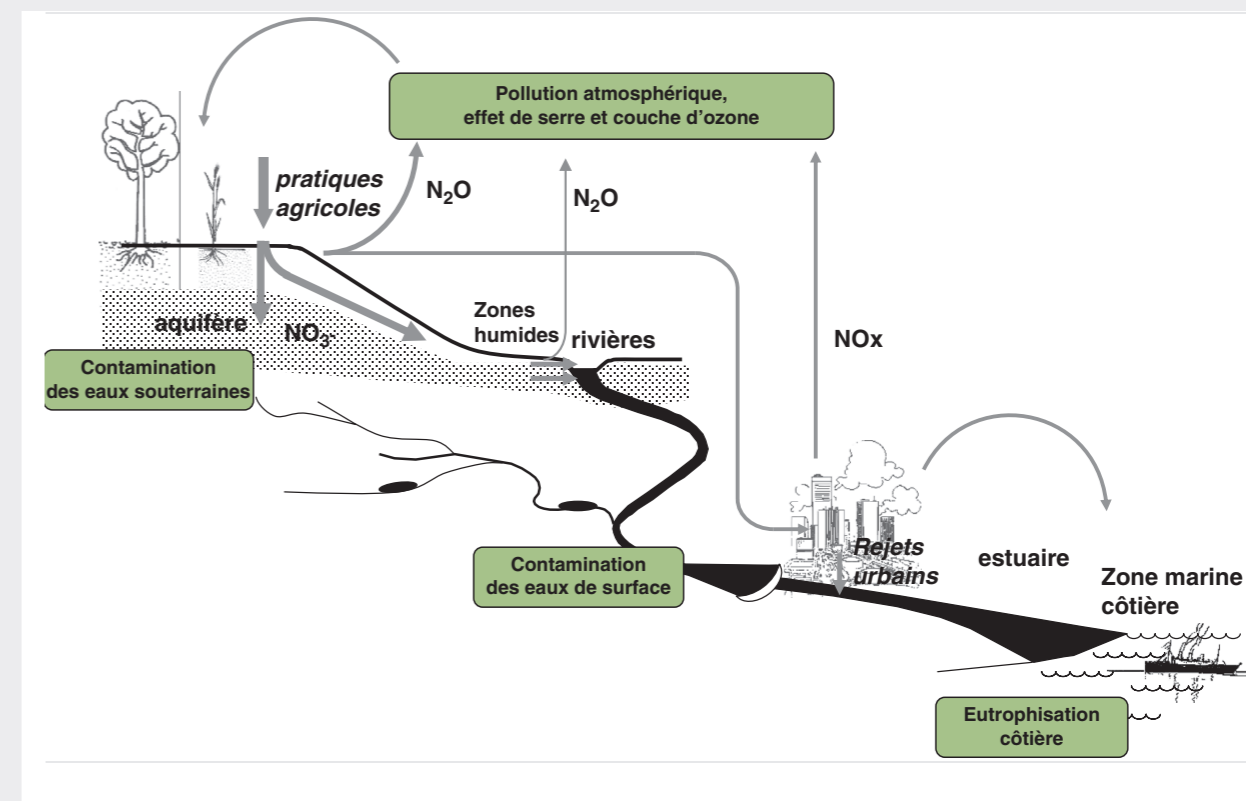
Pour désigner la multiplicité des effets de cette « fuite d'azote » dans les écosystèmes, on parle d'effets en cascade.

■ QUELLE EST LA VARIABLE DE CONTRÔLE RETENUE ?

L'indicateur retenu par les scientifiques est la quantité d'azote réactif généré de manière anthropique pendant une année au niveau planétaire. Cette quantité correspond à de l'azote inactif (N_2) issu de l'atmosphère qui a été rendu actif par des processus de fixation anthropiques. Ces derniers sont de quatre types : la fixation d'azote par process industriel (correspondant essentiellement à la fabrication des engrais), la fixation d'azote par les légumineuses cultivées, la fixation d'azote générée par la combustion des énergies fossiles et, enfin, la fixation d'azote résultant de la combustion de la biomasse.

La valeur est exprimée en terragrammes d'azote par an (tG N/an).

Figure 2 : Le cheminement de l'azote depuis les sols agricoles jusqu'aux zones marines (Billen et coll., 2013)



L'agriculture n'est pas la seule source de production d'azote d'origine anthropique

L'agriculture n'est pas la seule source de production d'azote d'origine anthropique. Les eaux usées, si elles sont rejetées dans les milieux naturels sans procédés de traitement efficaces, peuvent être une autre source importante. La combustion des énergies fossiles et certains processus industriels constituent un autre facteur de perturbation du cycle de l'azote, notamment parce qu'ils génèrent dans l'atmosphère des oxydes

d'azote (NOx). Ces derniers peuvent avoir des effets divers : ils participent par exemple aux phénomènes de pluie acide (par la production d'acide nitrique dans l'atmosphère), et plus généralement les retombées atmosphériques d'azote oxydé sur les écosystèmes s'ajoutent aux flux d'azote issus de l'agriculture. Cette dernière est toutefois, au niveau mondial, la principale source d'apport d'azote d'origine anthropique.

■ QUELLE EST LA FRONTIÈRE PLANÉTAIRE ? 62 Tg N/an

Établir une limite et une frontière planétaire pour l'azote réactif est une tâche particulièrement délicate. Les scientifiques comparent les flux d'azote réactif à un robinet dont il s'agirait d'adapter le débit afin qu'il n'outrepasse pas les capacités des différents milieux à stocker et recycler ces flux entrants. Dès lors, deux difficultés majeures apparaissent : d'une part les limites peuvent varier selon le type d'impact considéré (eutrophisation, pollution des nappes phréatiques, etc.) ; d'autre part les écosystèmes n'ont pas les mêmes vulnérabilités partout sur la planète, rendant la fixation d'un seuil global délicate.

Pour estimer ces capacités au niveau global, Wim de Vries et ses collègues (2013) ont donc étudié les différents types d'impacts susmentionnés. Will Steffen et ses collègues ont retenu de cette étude une valeur cible qui concerne le risque d'eutrophisation des écosystèmes aquatiques : en répartissant convenablement les pressions au niveau global, ils estiment qu'un niveau de fixation de 62 Tg N/an pourrait être assumé sans dégrader irrémédiablement la qualité des écosystèmes en question.

■ QUELLE EST LA VALEUR ACTUELLE ? 150 Tg N/an

La valeur actuelle de fixation d'azote par des procédés anthropiques est aujourd'hui estimée au niveau mondial à environ 150 Tg N/an. Les principales formes de fixation de l'azote atmosphérique sont, par ordre d'importance :

- La fabrication industrielle d'azote réactif, sous forme essentiellement d'engrais : 80 Tg N/an.
- La fixation d'azote par les légumineuses (cultivées par l'homme) : 40 Tg N/an.
- La combustion d'énergies fossiles : 20 Tg N/an.
- La combustion de la biomasse : 10 Tg N/an.

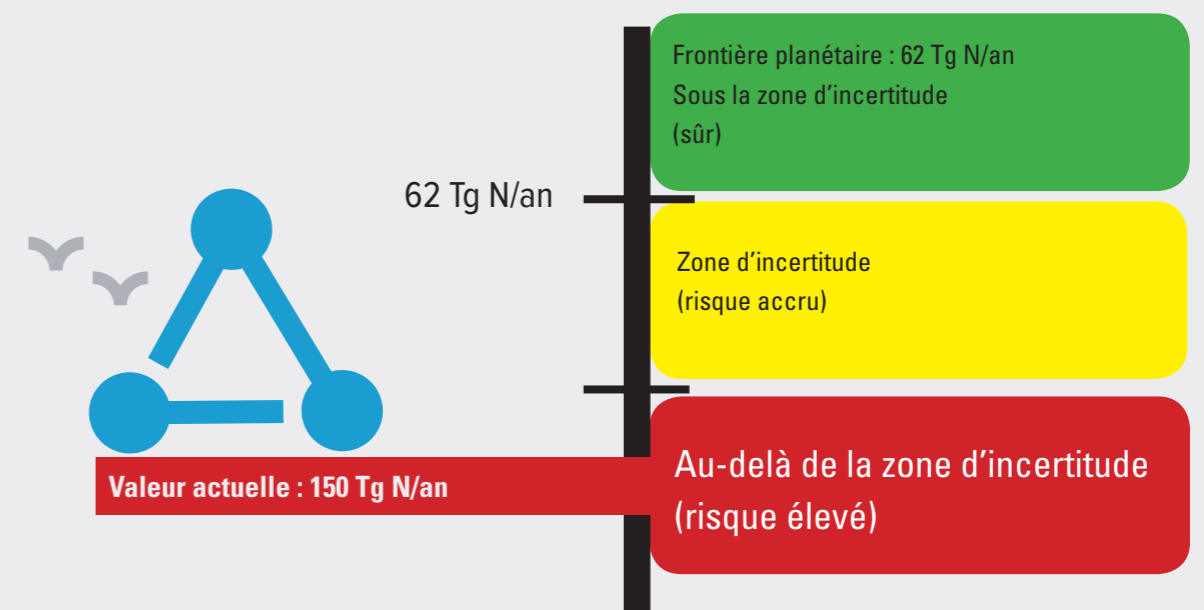
La production agricole est donc le secteur très majoritairement responsable du déséquilibre du cycle de l'azote avec environ 120 Tg N/an, dont la majeure partie liée aux engrais minéraux.

Quel lien avec les autres processus planétaires ?

Le déséquilibre du cycle de l'azote a des effets sur différentes autres limites planétaires.

L'intensification du processus de dénitrification par certaines bactéries se traduit par un accroissement des émissions de protoxyde d'azote (N_2O), un gaz à effet de serre au potentiel de réchauffement global très élevé, partiellement responsable du **changement climatique**. La plupart des pertes d'azote en agriculture se fait dans les eaux souterraines et de surface : la pollution aux nitrates représente donc une menace pour la **disponibilité en eau potable**, tandis que l'eutrophisation des écosystèmes aquatiques a des effets néfastes sur la biodiversité de ces milieux.

Plus marginalement, d'autres limites peuvent être impactées par ce déséquilibre du cycle de l'azote, comme l'**acidification des océans**. Le **changement d'affectation des sols**, qui se traduit le plus souvent par un accroissement des surfaces agricoles au détriment des espaces naturels, n'est par ailleurs pas étranger au bouleversement du cycle de l'azote.



QUE PEUT-ON FAIRE ?

Généraliser le traitement des eaux usées

En Europe, en plus des apports agricoles, les eaux usées ont longtemps occupé une place non négligeable dans le relargage d'azote dans la nature. La généralisation des stations d'épuration a abouti à des résultats notables : par exemple, sur le bassin de la Seine, l'apport d'azote dans les réseaux hydrographiques est passé de 38 k/tonnes d'N/an en 1985 à moins de 10 k/tonnes N/an (Passy et coll., cité par Billen et coll., 2013). Valoriser les déjections humaines dans l'agriculture, plutôt que les évacuer dans l'eau, est également une piste encore peu explorée en Europe mais pratiquée ailleurs.

Continuer à améliorer les procédés émetteurs d'oxydes d'azote

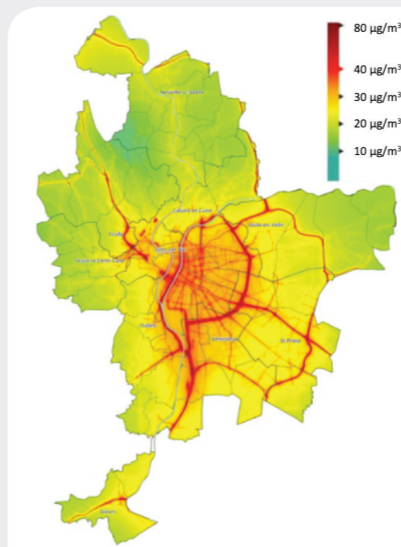
Le trafic automobile ou la production thermique d'électricité génèrent des émissions d'oxydes d'azote qui contribuent aux retombées d'azote réactif. Dans certaines régions urbanisées, ces émissions sont plus importantes que celles liées à l'agriculture. En Europe, la mise en œuvre de réglementations a permis de réduire de manière importante les émissions des véhicules et des usines : par exemple, en Île-de-France, les retombées atmosphériques sont passées de 19 à 10 kg N/ha/an entre 1980 et 2010. (Billen et coll., 2013) La réduction du trafic automobile et plus globalement des consommations d'énergie représente un autre levier d'action important.

Mais surtout, changer les pratiques agricoles...

Enfin, puisque la majorité de la dispersion d'azote dans l'environnement s'opère au niveau de l'agriculture, c'est bien entendu dans ce secteur que les efforts doivent être prioritairement orientés. Certaines pratiques culturales peuvent limiter les fuites d'azote dans la nature. Il s'agit notamment de mieux équilibrer la fertilisation des sols en évitant la surabondance d'azote par l'application de règles de calcul de fumure, ou encore en développant la rotation de cultures et la polyculture. Par exemple, certaines régions françaises comme la Bretagne se sont trop spécialisées dans l'élevage intensif, produisant davantage d'azote que le milieu n'est capable d'en séquestrer, alors même que d'autres régions comme la Beauce, spécialisées dans la production végétale, ont besoin de ces apports azotés qu'elles trouvent aujourd'hui dans le recours massif à l'azote minéral. Gilles Billen et ses collègues (2013) notent toutefois que même cette condition n'est pas suffisante : « *le problème de la contamination nitrique appelle donc une remise en cause beaucoup plus profonde du modèle agricole.* » Les auteurs préconisent une généralisation des modes de production inspirés de l'agriculture biologique et de la polyculture qui, selon leurs modélisations réalisées sur le bassin parisien, permettraient de répondre aux besoins du territoire tout en garantissant une qualité élevée des eaux des écosystèmes aquatiques et des nappes phréatiques. C'est le choix qu'a fait la régie d'eau de la ville de Paris, qui finance des reconversions vers la polyculture et le biologique dans les territoires agricoles environnants (dont la ville puise l'eau) pour prévenir les pics de nitrates (Valo, 2019).

...et modifier les comportements alimentaires

Dans une autre étude, Gilles Billen montre toutefois que les besoins alimentaires des habitants de l'Île-de-France dépendent de productions de calories d'origine animale largement délocalisées dans le nord-ouest de la France et même bien au-delà (jusqu'en Amérique latine pour la production de l'alimentation du bétail). Ce phénomène correspond à une sorte de délocalisation des pollutions azotées. Afin de résoudre le problème plus globalement, il convient donc non seulement de produire différemment (bio et local), mais aussi de consommer autrement. Pour atteindre un équilibre, les auteurs proposent de diviser par deux la part de protéines d'origine animale dans la diète des parisiens, ce qui rejoint de nombreuses recommandations sanitaires (Billen et coll., 2012).



Concentrations moyennes annuelles en NO₂ en 2016

La pollution des nappes phréatiques

Les métropoles peuvent également être menacées par la pollution des nappes phréatiques : la présence excessive de nitrates est en effet la première cause qualitative de fermeture de captages d'eau potable. Au-delà de 50 mg/L, l'eau est considérée comme impropre à la consommation, or de nombreux aquifères dépassent déjà ce seuil, notamment dans le bassin parisien, le long de la Loire et en Bretagne. Les ressources en eau potable sur le territoire de la Métropole de Lyon sont diverses et leurs concentrations en nitrates sont variables : faible dans la nappe alluviale du Rhône (<10 mg/L), moyenne dans la nappe de la Saône, plus élevées dans la nappe de l'est Lyonnais (entre 30 et 60 mg/L). En 2018, les concentrations en nitrate dans l'eau distribuée dans le réseau d'eau potable de la métropole étaient comprises entre 5 et 28 mg/L, sachant que plus de 80 % de la population est alimentée par une eau dont les concentrations sont inférieures à 10 mg/L et 100 % de la population est alimentée par une eau dont la concentration est inférieure à la norme de 50 mg/L (source : Direction de l'eau, Métropole de Lyon).

Pour préserver les ressources en eau potable, 5 captages situés sur le territoire de la Métropole de Lyon ont été classés prioritaires afin de lutter contre les pollutions azotées des nappes souterraines avérées dans les secteurs concernés. La Métropole est engagée dans un Projet Agro-Environnemental et Climatique, et des mesures agro-environnementales (MAEC) sont mises en œuvre depuis 2016 pour faire réduire les intrants de matières azotées dans les sols, par un changement des pratiques agricoles. La démarche étant encore récente, les effets de ces mesures ne sont pas encore significatifs (source : Direction de l'eau, Métropole de Lyon).

L'eutrophisation des cours d'eau

L'état de la grande majorité des cours d'eau de la Métropole de Lyon est classé bon à très bon au regard de leur concentration en composés azotés. Comme dans la plupart des métropoles, la généralisation et l'amélioration des performances des stations d'épuration sur le territoire du Grand Lyon au cours des dernières décennies a permis de réduire notablement les rejets d'azote véhiculés par les eaux urbaines dans les milieux naturels. Les performances des stations de traitement des eaux usées ont été nettement améliorées à partir de 2011, suite à d'importants travaux réalisés sur les installations. Malgré une augmentation de la charge entrante dans les systèmes consécutive à l'augmentation de la population et à l'amélioration de la collecte des eaux usées, l'abattement de l'azote organique est passé d'environ 55% à 85% (source : Direction de l'eau, Métropole de Lyon).

Des leviers pour alléger notre empreinte azote

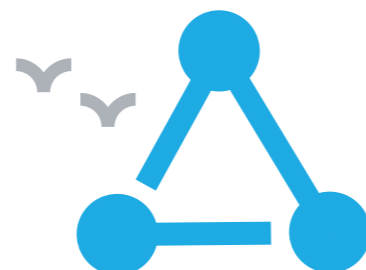
Enfin, comme pour la plupart des enjeux globaux, une partie de l'impact des métropoles est liée au mode de vie de leurs habitants, qui génèrent des impacts bien au-delà des frontières du territoire métropolitain. La quasi totalité de la production alimentaire de la métropole provient de zones rurales – en France et parfois bien au-delà – vers lesquelles les impacts négatifs sont externalisés. Une étude menée en Île-de-France montre par exemple que les aliments consommés par les parisiens contiennent 7,7 kgN/hab/an, qui sont intégralement rejetés dans le milieu par le biais des eaux usées ou sous forme de déchets fermentescibles. Cependant, cet azote incorporé dans la consommation finale des parisiens suppose la mobilisation de flux d'azote beaucoup plus importants en amont du processus de production, notamment sur les zones de production agricole de la région, mais plus encore dans le nord-ouest de la France et même l'Amérique latine. Cette empreinte azote correspond à plus de 30 kgN/hab/an de flux apparents et non apparents, générant d'énormes pertes dans les milieux naturels au niveau de la production animale, essentiellement située en Bretagne et Normandie. Cela revient à dire que la consommation alimentaire des parisiens a des effets directs sur le déséquilibre du cycle de l'azote en Bretagne et en Normandie (Billen et coll., 2012). Il en va sans doute de même pour la métropole lyonnaise. Un enjeu majeur consiste donc à réduire l'empreinte azote des habitants, par exemple :

- en augmentant la part d'alimentation issue de l'agriculture biologique et de la polyculture ;
- en réduisant autant que possible les gaspillages alimentaires (estimés à environ 16 kg/hab/an dans la métropole : Grand Lyon, 2012). En la matière la Métropole sensibilise les habitants à la réduction du gaspillage alimentaire et de plus en plus de distributeurs donnent leurs invendus, mais il faut continuer la mobilisation et impliquer davantage les acteurs de la production et de la transformation ;
- mais aussi en réduisant la part d'alimentation d'origine animale – environ d'un facteur de moitié si on en croit l'exemple parisien.

D'autres leviers, sont mobilisables, comme le retour au sol de la part fermentescible des déchets : par exemple, la Métropole de Lyon promeut le compostage individuel et l'accompagnement de projets collectifs afin de favoriser un recyclage des matières fertilisantes dans les jardins individuels ou partagés.

BIBLIOGRAPHIE

- Billen G., Garnier J., Thieu V., Silvestre M., Barles S., Chatzimpiros P., 2012. « Localising the nitrogen imprint of the Paris food supply: the potential of organic farming and changes in human diet » in Biogeosciences, n°9, pp. 607–616
- Billen G., Garnier J., Benoît M., Anglade J., 2013. « La cascade d'azote dans les territoires de grande culture du Nord de la France » in Les Cahiers de l'Agriculture, vol. 22, n°4, juillet-août 2013.
- CGDD – Commissariat Général au Développement Durable, 2013. « Les surplus d'azote et les gaz à effet de serre de l'activité agricole en France métropolitaine en 2010 », Chiffres et Statistiques, n°448, Septembre 2013. - <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2018-10/chiffres-stats448-nopolu-en-2010-septembre2013.pdf>
- Esculier F., 2016. « L'empreinte azote dans nos modes de vie », Support de présentation du 16 janvier 2016. - <https://docplayer.fr/38215377-L-empreinte-azote-dans-nos-modes-de-vie-esculier-fabien-chercheur-en-ecologie-21-janvier-2016.html>
- Grand Lyon 2012. « Rapport annuel sur le prix et la qualité du service public d'élimination des déchets ». Grand Lyon. - https://www.grandlyon.com/fileadmin/user_upload/media/pdf/proprete/rapports/20151216_gl_proprete_rapportannuel_2014.pdf
- Grand Lyon 2016. Plan oxygène. Dossier de presse. Grand Lyon, Air Rhône-Alpes. - https://www.grandlyon.com/fileadmin/user_upload/media/pdf/espace-presse/dp/2016/20160621_dp_plan-oxygene.pdf
- Peyraud J.L., Cellier P., « Les flux d'azote liés aux élevages. Réduire les pertes, rétablir les équilibres ». Rapport d'expertise réalisé à la demande des ministères en charge de l'Agriculture et de l'Écologie, INRA. Mis en ligne en mars 2012. - <https://www6.paris.inra.fr/depe/content/download/3375/33119/version/1/file/rapport+complet-page1-528.pdf>
- de Vries W., Kros J., Kroeze C., Seitzinger S. P., 2013. « Assessing planetary and regional nitrogen boundaries related to food security and adverse environmental impacts » Current Opinion in Environmental Sustainability, n°5, pp. 392–402.
- Valon Martine, 2019. « Pour protéger son eau, Paris veut convertir au bio », Le Monde, 19 avril 2019, p.14.



LES PERTURBATIONS DU CYCLE DU PHOSPHORE

■ QU'EST-CE QUE C'EST ?

Le phosphore, un élément vital pour la biosphère... mais rare

Tout comme l'azote, le phosphore est un élément nutritif indispensable aux végétaux et aux animaux. Pour les végétaux, il intervient dans le stockage et le transfert d'énergie, mais aussi dans la formation de composés structuraux nécessaires à la croissance des racines, à la formation des graines, des fruits et des fibres, ainsi que dans la maturation des fruits et la germination des semences. Pour les animaux, il est un élément essentiel de l'ADN, des membranes cellulaires, des enzymes, des os et du transfert d'énergie (Nemery, 2018). Mais s'il est indispensable au vivant, le phosphore est également un élément rare dans l'environnement naturel. Contrairement à l'azote, il n'existe pas sous forme gazeuse et se concentre essentiellement dans la lithosphère, où il représente moins de 0,1 % de la masse des roches terrestres.

Un cycle naturel en équilibre

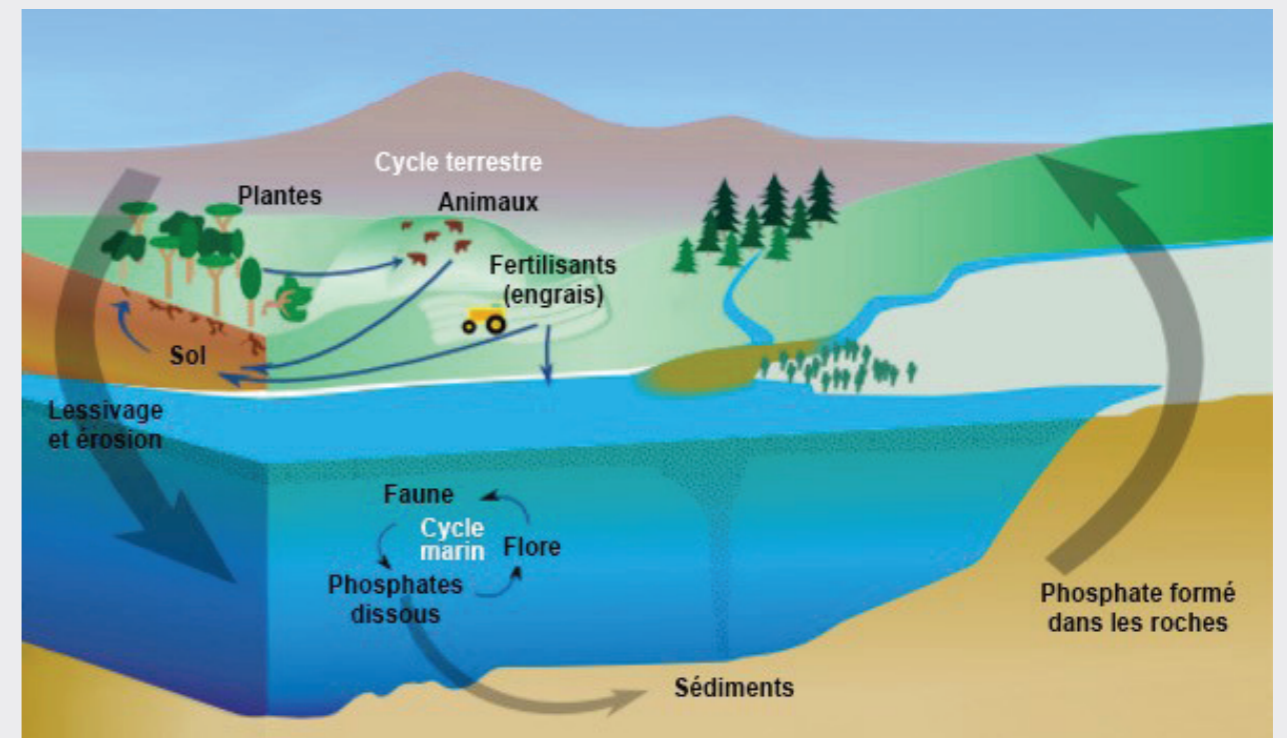
À l'état naturel, le phosphore se trouve sous forme de phosphates de calcium, de fer et d'aluminium, dans les roches volcaniques et sédimentaires. Les phosphates sont naturellement dissous suite à l'altération de ces roches par l'eau de pluie. Les végétaux prélèvent alors les phosphates ainsi solubilisés et les utilisent pour produire de la matière organique lors de la photosynthèse. Le phosphore se propage ensuite dans la biosphère par le biais de la chaîne alimentaire, suite à la consommation des plantes par les animaux, puis des animaux entre eux. Enfin, la décomposition de la matière morte et des effluents (rejets liquides) animaux par les microorganismes permet de rendre le phosphore à nouveau soluble (Nemery, 2018). Par exemple, de 0,5 kg à 1 kg de phosphore est rejeté chaque année par les excréments humains d'un européen (SCU, 2013).

Présent dans différents types d'écosystèmes terrestres (lacs, rivières, forêts, pâtures), le phosphore suit ainsi une succession de phases organiques (quand il est dans les cellules vivantes) et minérales (après décomposition du vivant). À plus grande échelle, le phosphore qui est introduit dans les écosystèmes par l'érosion hydrique et le lessivage des sols est acheminé par les fleuves jusqu'aux zones côtières où il fertilise les eaux littorales (cf. Figure 1). Ces eaux sont ainsi très productives en phytoplanctons, qui vont à leur tour propager le phosphore dans toute la chaîne alimentaire marine (Nemery, 2018).

On notera enfin que, du fait de son absence de formes gazeuses, le phosphore issu des continents qui n'est pas réutilisé par les organismes vivants sédimente *in fine* dans les fonds des rivières et des océans, sans transfert dans l'atmosphère. Lorsqu'il échappe au recyclage de la biosphère (qui équivaut à son cycle court), le phosphore entre alors dans son cycle long : il faudra des millions d'années pour que ce phosphore sédimenté se transforme en roches phosphatées qui, lorsqu'elles seront soumises à l'érosion, permettront au phosphore d'être à nouveau rendu disponible pour le monde vivant.

Figure 1 : Cycle global du phosphore

(Source : Bonniemf Incorporates work by NASA Earth Science Enterprise [CC BY-SA 3.0], via Wikimedia Commons, traduit en français/ rapporté par Nemery, 2018)



■ QUEL EST LE PROBLÈME ?

Un déséquilibre massif du cycle du phosphore...

À partir du XIX^e siècle, des quantités importantes de phosphore issu de l'exploitation minière ont été mobilisées par l'Homme afin de produire des engrais ou encore des détergents. Ce processus a profondément déséquilibré le cycle du phosphore. Aux cycles naturels susmentionnés se sont donc ajoutés des cycles que l'on qualifie parfois de sociétaux, qui sont à la fois plus complexes et ouverts : ils consistent par exemple en l'épandage d'engrais minéraux, l'alimentation des animaux d'élevage, l'épandage des effluents d'élevages, la consommation de l'alimentation et la production d'effluents domestiques (SCU, 2013). Ce cycle sociétal se caractérise par un transfert du phosphore de la lithosphère (cycle long) dans la biosphère (cycle court), avec pour but essentiel d'accroître la productivité de la biomasse (surtout l'alimentation). Malheureusement, ce cycle se caractérise par d'énormes pertes : seul un cinquième du phosphore miné se retrouve dans l'alimentation que nous consommons (Cordel et al., 2009). Si on ajoute le fait que le phosphore contenu dans notre alimentation est la plupart du temps rejeté dans l'eau par le biais de nos urines et de nos selles, c'est au total 90 % du phosphore qui entre dans le système agro-alimentaire (via les engrais et les effluents d'élevage) qui est perdu et dissipé dans les milieux aquatiques tout au long du processus de production et de consommation (SCU, 2013).

...qui perturbe les écosystèmes aquatiques et terrestres...

Or la dispersion de phosphates est particulièrement problématique en milieu aquatique, où le phosphore passe par une succession de phases organiques (dans les êtres vivants) et minérales (après décomposition du vivant). Les concentrations naturelles en orthophosphates (forme chimique la plus fréquente du phosphate) des écosystèmes sont de l'ordre de 10 µg phosphore/litre (c'est-à-dire une millionième de gramme par litre). Elles peuvent atteindre plusieurs centaines de µg de phosphore/litre dans les milieux très affectés par les activités humaines – notamment la pollution liée aux eaux usées domestiques, la dissolution des engrais minéraux ou celle des effluents d'élevage (Nemery, 2018). Ainsi, la concentration en phosphore peut être multipliée par 10 dans certains écosystèmes, avec pour conséquence leur eutrophisation, en particulier lorsque l'excès de phosphore est associé à une température élevée, un écoulement lent et la présence en excès de nutriments.

L'eutrophisation génère différents effets négatifs sur les écosystèmes aquatiques : dégradation de la qualité de l'eau, accumulation de sédiments (envasement), prolifération d'algues bleues, et plus généralement modification de la biodiversité animale et végétale – les espèces les mieux adaptées aux nouvelles conditions étant favorisées au détriment de certaines déjà établies.

...et pourrait provoquer une asphyxie de la vie marine

En bout de chaîne, le phosphore est finalement rejeté dans les océans, où il a des impacts pour le moins préoccupants puisqu'il entraîne une diminution de l'oxygène dissous. Apparaissent alors, localement, des environnements anoxiques (littéralement « privés d'oxygène »), également appelés « zones mortes ». Ces dernières sont aujourd'hui présentes dans plusieurs points du globe, notamment la Mer Noire, la Mer Morte mais aussi de nombreuses zones des côtes océaniques européenne, nord-américaine et asiatique. La généralisation du phénomène pourrait entraîner un événement anoxique océanique (EAO), c'est à dire une baisse de la concentration en dioxygène à très grande échelle dans les océans, avec comme conséquence l'effondrement d'une part importante de la vie océanique. Le dernier EAO a eu lieu lors de la phase Paléocène-Eocène, il y a plus de 50 millions d'années, mais les tendances actuelles laissent penser qu'un tel événement pourrait à nouveau être en préparation, du fait cette fois-ci des activités humaines (Watson, 2016).



L'eutrophisation

L'eutrophisation est un phénomène complexe qui se traduit par une prolifération d'algues. Elle opère en réalité en plusieurs étapes :

1. Le milieu aquatique (lac, retenue d'eau, mare, voire zone côtière) reçoit des apports en éléments nutritifs (phosphore, mais aussi azote) pouvant provenir de plusieurs sources (naturelles et anthropiques) sur une courte ou longue période de temps.
2. Dans certaines conditions limitant la présence d'oxygène dans l'eau (augmentation de température, faible renouvellement de l'eau), la forte concentration d'éléments nutritifs génère la prolifération de plantes aquatiques et d'algues. Cela réduit la transparence de l'eau (qui devient plus turbide).

3. L'augmentation de la turbidité limite le passage de la lumière au fond de l'eau. La photosynthèse ne peut alors s'effectuer que près de la surface.

4. Les bactéries aérobies (qui ont besoin de dioxygène) qui jouent le rôle de décomposeurs, ne vont ainsi plus pouvoir consommer toute la matière organique qui va alors s'accumuler au fond de l'eau, dans un milieu dépourvu en oxygène (anoxie). Les bactéries aérobies vont alors être remplacées par des bactéries anaérobies (qui n'ont pas besoin de dioxygène).

5. La raréfaction de l'oxygène dissous au fond de l'eau modifie la biodiversité des espèces présentes (ex. : disparition d'espèces de poissons tels que les truites) (source : CRE, 2009).

Qui plus est, le phosphore utilisé par l'humanité est une ressource minière qui s'épuise

Par rapport à l'azote, la problématique du phosphore est particulière en cela qu'elle fait entrer en jeu une dimension de rareté. Le phosphore utilisé par l'humanité est en effet massivement issu de gisements minéraux non renouvelables. Il est ensuite associé à l'acide sulfurique, à l'azote et au potassium pour être transformé en engrais minéraux. Au rythme d'exploitation actuel, les réserves de roches phosphatées risquent d'être épuisées dans 50 à 100 ans (SCU, 2013). L'Union Européenne a classé le phosphore et les roches phosphatées parmi les 27 matières premières critiques et souligne qu'il présente à la fois un fort risque en termes d'approvisionnement ainsi qu'un très fort poids économique (EC, 2017). L'industrie des engrais reconnaît elle-même que la qualité des réserves diminue et que les coûts d'extraction, transformation et transport augmentent (Cordell, 2010), faisant peser une grave menace pour la sécurité de l'approvisionnement alimentaire de nos sociétés dans les décennies à venir.

■ QUELLE EST LA VARIABLE DE CONTRÔLE RETENUE ?

La variable de contrôle retenue est la **quantité de phosphore déversée dans l'environnement** par les activités humaines, exprimée en Teragrammes (ou Mégatonnes, c'est-à-dire millions de tonnes) de phosphore par an (Tg P/an).

■ QUELLE EST LA FRONTIÈRE PLANÉTAIRE ? 11 Tg N/an

11 Tg P/an pour les océans (et 6,2 Tg P/an pour les systèmes d'eau douce)

La frontière planétaire est fondée sur le dérèglement du cycle du phosphore, et plus précisément sur la prévention d'un événement anoxique océanique (EAO) à grande échelle (diminution de l'oxygène dissous dans les océans). Cette frontière est fondée sur des modélisations, mais dans l'état actuel des connaissances il est très difficile de savoir si (et quand) les bouleversements du cycle du phosphore sont susceptibles de provoquer un tel EAO, qui prendrait probablement plusieurs centaines d'années à se manifester. En première approche, la frontière proposée pour les flux anthropiques est fixée à 10 fois le flux naturel de phosphore, soit 11 Tg de phosphore par an issu des systèmes d'eau douce vers les océans.

En 2015, suite à la publication d'articles allant dans ce sens, Will Steffen et ses collègues ont proposé d'introduire également une frontière non pas seulement globale (pour les océans) mais régionale, afin d'éviter une eutrophisation généralisée des systèmes d'eau douce. En se fondant sur la littérature disponible, cette frontière est proposée à 6,2 Tg par an de phosphore épandu sur les sols sous forme d'engrais issus de roches phosphatées. Il s'agit donc de la quantité maximale de phosphore d'origine anthropique que les milieux d'eau douce pourraient supporter à la condition que cette pression soit équitablement répartie sur le globe.

Il faut noter au passage que ces limites ne prennent pas en compte la disponibilité du phosphore : il est en effet probable que des pénuries de phosphore apparaissent bien avant qu'un EAO ne soit constaté. Ce qui posera alors des difficultés d'approvisionnement pour l'agriculture et menacera la production alimentaire mondiale.

■ QUELLE EST LA VALEUR ACTUELLE ? 22 Tg P/an pour les océans

(et 14,2 Tg P/an pour les systèmes d'eau douce)

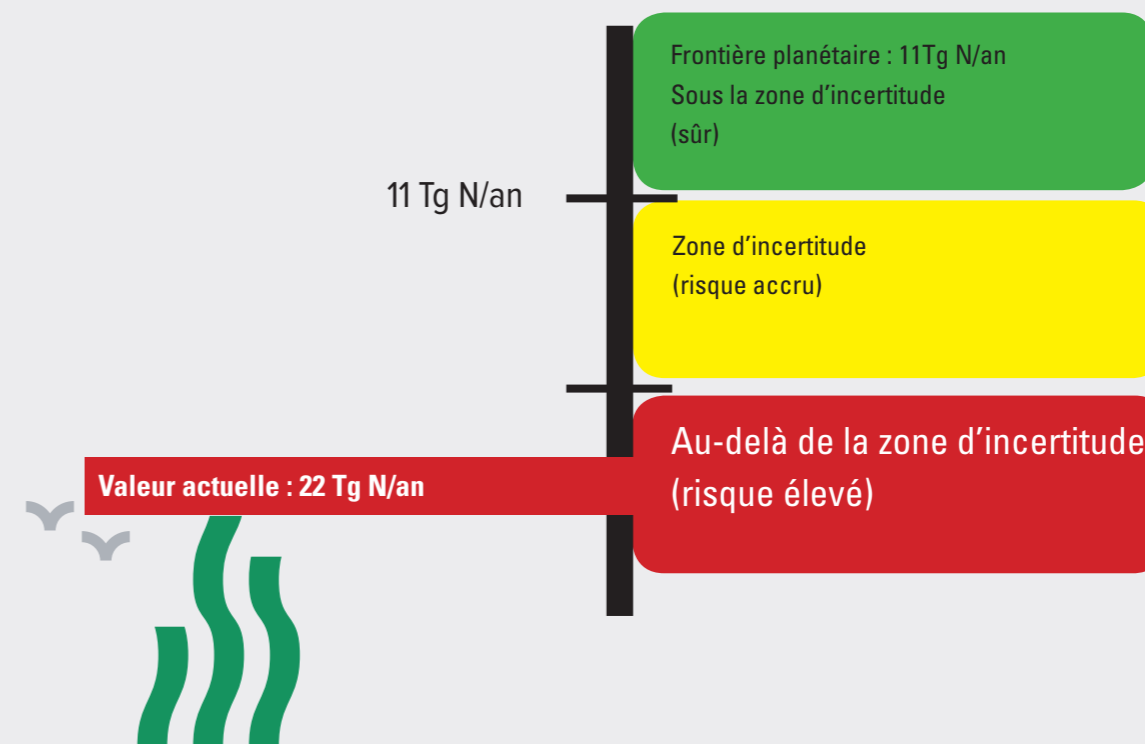
Le flux mondial de phosphore émis par le biais des systèmes d'eau douce vers les océans est aujourd'hui estimé à 22 Tg de phosphore en 2015.

Les flux régionaux de phosphore dans les engrais (qui sont les principales sources anthropiques de phosphore) épandus sur les sols érodables sont estimés en 2015 à 14,2 Tg de phosphore (Steffen et al., 2015).

Quel lien avec les autres processus planétaires ?

Les cycles de l'azote et du phosphore sont intimement associés par l'utilisation d'engrais constitués de ces éléments chimiques. Le cycle du phosphore est également lié au **changement climatique**, notamment parce que la lutte contre le changement climatique passe par un accroissement des besoins en biomasse pour des usages énergétiques et pour la séquestration du carbone. Or ces besoins croissants suppose d'interroger la disponibilité du phosphore, qui détermine en partie la productivité de la biomasse. Les capacités de séquestration de carbone pourraient ainsi être inférieures à ce que prédisent les modèles climatiques si l'on prenait en compte la faible disponibilité en Phosphore des sols de nombreux écosystèmes. L'INRA mène aujourd'hui des études sur ce sujet pour quantifier cet effet (Ringeval et al., 2017).

Du fait de ses impacts sur les écosystèmes aquatiques (terrestres et océaniques), le déséquilibre du cycle du phosphore a également des effets sur l'**intégrité de la biosphère** (notamment la biodiversité).



Quelques régions agricoles présentent des taux très élevés d'épandage de phosphore et sont donc les principales contributrices de ce dépassement des limites planétaires. Steffen et al. (2015) suggèrent qu'une redistribution du phosphore des zones où son utilisation est manifestement trop élevée (par exemple les zones d'agriculture et d'élevage intensif, les zones avales des métropoles où sont déversées les eaux usées, etc.) vers des zones naturellement pauvres en phosphore pourrait à la fois stimuler la production agricole dans certains espaces et réduire l'eutrophisation dans d'autres régions. Comme pour l'azote, remplacer les zones de spécialisation agricole (animale versus végétale) par des systèmes de polyculture permettrait également d'optimiser les usages (cf. paragraphe suivant).



QUE PEUT-ON FAIRE ?

Réduire les pertes des exploitations minières de phosphore

Les mines de roches de phosphate sont concentrées dans quelques régions du monde (Etats-Unis, Chine, Russie et Sahara en particulier). Leur exploitation génère de nombreuses pertes, se traduisant en dégradations environnementales importantes sur les lieux d'exploitation. Des développements technologiques sont étudiés et envisagés afin de réduire ces pertes sur les lieux d'exploitation (SCU, 2018).

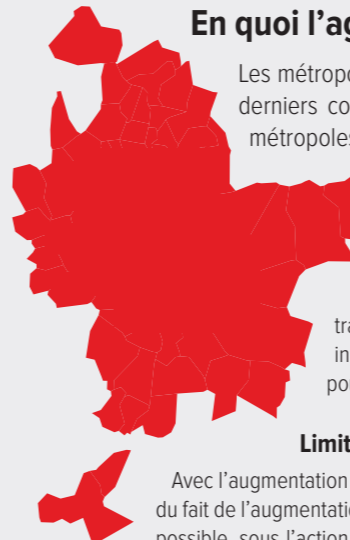
Changer les pratiques agricoles...

La dépendance au phosphore et la majorité de la dispersion en phosphore dans l'environnement s'opérant au niveau de l'agriculture, c'est bien entendu dans ce secteur que les efforts doivent être prioritairement orientés. L'agriculture biologique, qui interdit le recours aux engrais de synthèse, est évidemment une première piste indispensable, mais elle nécessite toutefois des apports en phosphore. Ainsi, la polyculture (et plus généralement la proximité entre exploitations agricoles végétales et animales) ou l'épandage de boues de stations d'épurations urbaines riches en phosphore apparaissent indispensables pour assurer l'autonomie locale en phosphore et azote (Nowak, 2013). Réduire l'érosion des sols et maintenir la qualité des sols permettraient aussi de limiter les pertes de phosphore (SCU, 2018). D'autre part, de nombreux sols présentent aujourd'hui des excédents de phosphore, mais faute d'une bonne connaissance, des engrais sont malgré tout épandus. Des marges de progression semblent importantes pour mieux faire correspondre les épandages d'engrais aux besoins réels des sols (SCU, 2018). Une autre piste consisterait à améliorer l'absorption du phosphore par les plantes en choisissant des cultures adaptées et en favorisant les associations symbiotiques entre plantes (SCU, 2018).

...et modifier les comportements alimentaires

Les solutions pour réduire notre dépendance au phosphore sont globalement les mêmes que celles préconisées pour réduire notre impact sur le cycle de l'azote. Ainsi, la délocalisation de productions de calories d'origine animale dans le nord-ouest de la France et même bien au-delà (jusqu'en Amérique latine pour la production de l'alimentation du bétail) correspond aussi à une délocalisation des pollutions phosphorées ainsi qu'à une perte de gisements potentiels de phosphore pour les exploitations agricoles (céréalières en particulier) situées dans d'autres zones de la France et qui ne peuvent donc utiliser les effluents d'élevages animaux pour amender leurs sols. Afin de résoudre le problème plus globalement, il convient donc non seulement de produire différemment (bio, local, en polyculture...) mais aussi de consommer autrement. Comme pour l'azote, atteindre un équilibre local suppose bien souvent de réduire la part de protéines d'origine animale, ce qui rejoint de nombreuses recommandations sanitaires (Billen et coll., 2012). Réduire les pertes et gaspillages au sein des chaînes d'approvisionnement alimentaires est aussi une piste indispensable (SCU, 2018).

En quoi l'agglomération lyonnaise est-elle concernée ?



Les métropoles subissent en général peu d'effets directs du bouleversement du cycle du phosphore, ces derniers concernant surtout les milieux naturels, et particulièrement les écosystèmes aquatiques. Les métropoles ne sont toutefois pas indemnes de tout risque et, bien entendu, elles portent une part de responsabilité dans ces déséquilibres.

Améliorer le traitement des eaux usées

Une part importante de phosphore est rejetée dans les milieux aquatiques par le biais des déjections humaines. La Métropole collecte environ 750 tonnes de phosphore par an dans les eaux usées, et en traite 300 tonnes (avec un rendement de 45% par les filières de traitement classiques). Des techniques innovantes permettent aujourd'hui de récupérer le phosphore dans les stations d'épurations urbaines pour pouvoir le valoriser, mais les stations de la Métropole de Lyon n'en sont pas équipées..

Limiter l'eutrophisation des plans et cours d'eau

Avec l'augmentation de température associée au changement climatique et une pression plus forte sur les ressources en eau du fait de l'augmentation de la population lyonnaise, un risque d'eutrophisation des plans et cours d'eau du Grand Lyon apparaît possible, sous l'action combinée des rejets d'azote et de phosphore. Aujourd'hui, comme évoqué pour l'azote, les rivières et cours d'eau de l'agglomération sont toutefois assez peu menacés (cf. fiche « Les perturbations du cycle de l'azote »). Il n'empêche que des actions peuvent être menées auprès des agriculteurs afin d'améliorer les pratiques culturales dans une optique de limitation des pertes de phosphore (polyculture, cultures et pratiques adaptées, etc.).

Limiter l'empreinte phosphore des habitants du territoire

Enfin, comme pour la plupart des enjeux globaux, une partie de l'impact des métropoles est lié au mode de vie de leurs habitants, qui génèrent des impacts bien au-delà des frontières du territoire métropolitain. La quasi totalité de la production alimentaire de la métropole provient de zones rurales – en France et parfois bien au-delà – vers lesquelles les impacts négatifs sont externalisés. En utilisant des statistiques de l'OMS, D. Cordell (2010) a montré que la présence du phosphore dans les excréments des végétariens (environ 0,3 kg de phosphore par an) était bien plus faible que celle des personnes consommant de la viande (environ 0,6 kg de phosphore par an). Compte-tenu des pertes dans la chaîne alimentaire, D. Cordell a ainsi estimé que 0,6 kg de phosphore sont extraits par an pour une personne ayant un régime végétarien (soit 4,2 kg de roches phosphatées) contre 1,6 kg (et 11,8 kg de roches phosphatées) pour un régime omnivore. Le régime alimentaire a donc un impact notable sur les émissions de phosphore dans la nature.

Boucler les cycles du phosphore

Plusieurs pistes sont envisageables afin d'améliorer le taux de récupération du phosphore au sein de ces différents cycles. Être plus ambitieux sur le traitement et le recyclage du phosphore contenu dans les eaux usées domestiques permet à la fois de limiter les flux de phosphore apportés aux milieux aquatiques par les rejets de stations d'épuration (déphosphatation physique ou biologique), mais aussi de réutiliser le phosphore pour les pratiques agricoles. Ce recyclage du phosphore peut également s'obtenir par le compostage des déchets organiques (SCU, 2018).

BIBLIOGRAPHIE

- CRE Laurentides. 2009. « L'eutrophisation », mis en ligne sur le site du CRE Laurentides. - https://crelaurentides.org/images/images_site/documents/troussedeslacs/Fiches/fiche_eutrophisation.pdf
- Cordell D., Drangert J-O., White S., 2009. « The story of phosphorus: Global food security and food for thought ». *Global Environmental Change*, n°19, pp. 292–305
- Cordell D.. 2010. The Story of Phosphorus - « Sustainability implications of global phosphorus scarcity for food security ». Linköping University. - <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:291760/FULLTEXT01.pdf>
- EC - European Commission, 2017. « Critical Raw Materials 2017 » mis en ligne sur le site de la Commission Européenne. - http://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical_en
- Nemery J., 2018. « Phosphore et eutrophisation » Encyclopédie de l'environnement, mis en ligne le 27 juin 2018. - <https://www.encyclopedie-environnement.org/eau/phosphore-et-eutrophisation/>
- Nowak B. 2013. « Diminuer la dépendance aux engrais de synthèse par le recyclage local des éléments minéraux : analyse des stratégies d'approvisionnement en éléments minéraux des exploitations agricoles biologiques ». Thèse de doctorat en Sciences agricoles. Université Sciences et Technologies – Bordeaux.
- Ringeval B., Hinsinger P., Pellerin S. 2017. « Le phosphore : une ressource limitée et un enjeu planétaire pour l'agriculture du 21ème siècle » INRA Science & Impacts. - <http://www.inra.fr/Chercheurs-etudiants/Systemes-agricoles/Toutes-les-actualites/Le-phosphore-une-ressource-limitee-et-un-enjeu-planetaire-pour-l-agriculture-du-21eme-siecle>
- SCU - Science Communication Unit - University of the West of England, Bristol, 2013. « Science for Environment Policy In-depth Report: Sustainable Phosphorus Use ». Report produced for the European Commission DG Environment, October 2013. - <http://ec.europa.eu/science-environment-policy>
- Watson A.J., 2016. « Oceans on the edge of anoxia », *Science*, vol. 354, n°6319, pp. 1529-1530



LES PERTURBATIONS DU CYCLE DE L'EAU DOUCE

■ QU'EST-CE QUE C'EST ?

L'eau douce ne représente qu'une fraction de l'eau disponible sur Terre...

La présence d'eau sous forme liquide vaut à la Terre son surnom de « planète bleue. » En effet, plus de 70 % de la surface terrestre est occupée par les océans, qui représentent de très loin le premier réservoir d'eau mondial puisque plus de 97 % de cette dernière y est stockée. L'eau douce est donc très marginale puisqu'elle représente moins de 3 % du total de l'eau mondiale, ce qui équivaut tout de même à près de 40 millions de km³. Le principal réservoir d'eau douce est constitué des calottes glaciaires (presque 75 % de l'eau douce mondiale), suivies des eaux souterraines (24 % du total de l'eau douce mondiale est en effet contenue dans la lithosphère). Le reste de l'eau douce (moins d'1 % du volume mondial d'eau douce) se répartit entre l'eau de surface (lacs et rivières), l'eau contenue dans la partie superficielle des sols, l'atmosphère et la biosphère (c'est à dire l'eau contenue dans les organismes vivants).

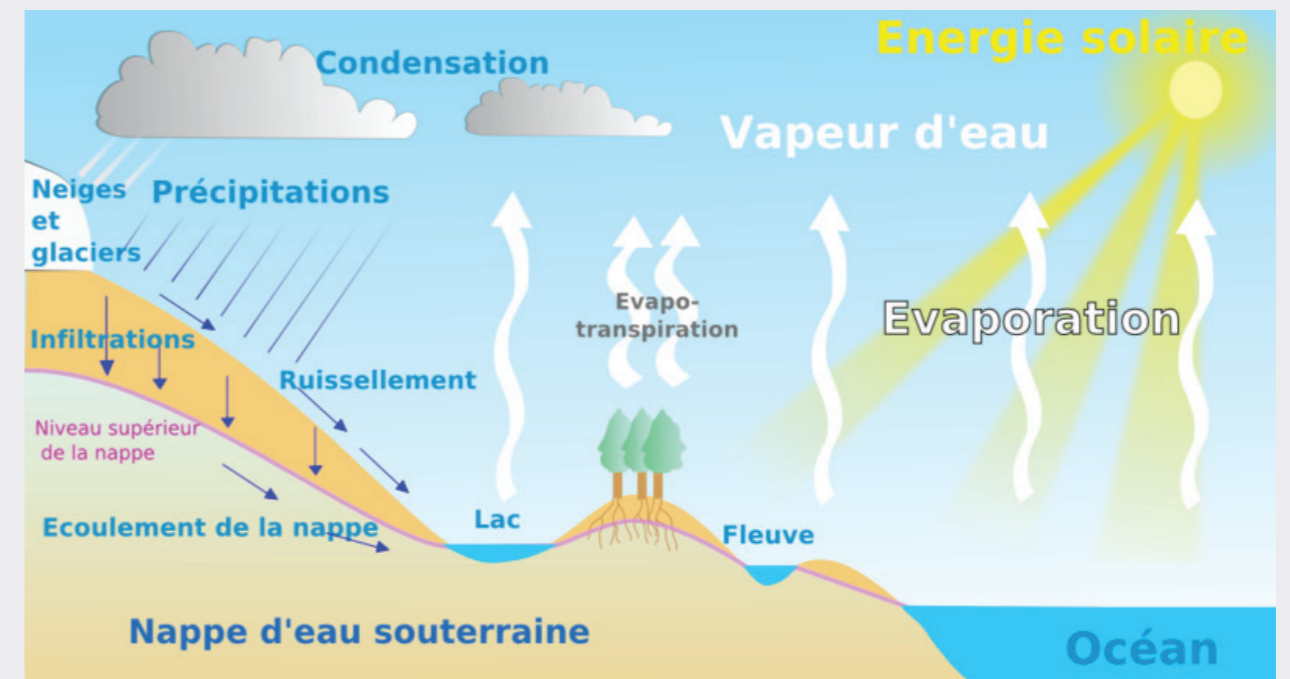
L'eau est donc peu présente dans l'atmosphère, proportionnellement à l'hydrosphère. Mais cette faible part doit être relativisée, car le temps de résidence moyen de l'eau dans les océans est de plusieurs milliers d'années, là où son temps de résidence dans l'atmosphère est en moyenne de 8 jours. L'atmosphère est donc un vecteur important du cycle de l'eau.

...mais le cycle de l'eau douce joue un rôle central dans la régulation du système Terre

L'eau circule en effet entre les différents réservoirs de l'hydrosphère, de l'atmosphère, de la lithosphère et de la biosphère par le biais de processus qui forment ce que l'on appelle couramment le cycle de l'eau (cf. Figure 1). Sous l'effet du soleil, l'eau contenue dans les différents stocks de surface de l'hydrosphère (en particulier les océans) s'évapore et migre dans l'atmosphère. Il en va de même d'une partie de l'eau contenue dans la biosphère, du fait en particulier de l'évapotranspiration des végétaux. Cette vapeur d'eau se condense et forme alors des nuages qui, une fois un certain niveau de saturation atteint, relâchent vers le sol l'eau qu'ils contiennent sous forme de neige ou de pluies. Un peu moins d'un quart de cette eau issue des précipitations rejoint les surfaces émergées, où elle suit alors différents chemins possibles : une partie ruisselle en surface et s'écoule dans les cours d'eau, jusqu'à éventuellement rejoindre les océans (pour la partie qui ne s'est pas évaporée entre temps) ; une autre partie s'infiltrate dans le sol et génère un écoulement souterrain qui, lui aussi, finira par rejoindre l'eau de surface (sources, nappes alluviales, etc.) et, *in fine*, les océans.

Le cycle de l'eau douce est fondamental pour la biosphère. D'une part parce que les eaux de surface constituent des écosystèmes (comme les rivières, les lacs ou encore les étangs) dont dépendent de nombreux organismes vivants. D'autre part parce que l'eau douce est un élément indispensable à la vie animale et végétale ; elle s'avère notamment fondamentale pour les plantes et détermine en grande partie la productivité de la biomasse végétale – c'est

Figure 1 : Le cycle de l'eau (source Wikimedia Commons)



ce dont témoignent par exemple les chutes de productivité de nombreuses cultures lors des périodes de sécheresse. Enfin, les écosystèmes d'eau douce jouent un rôle important dans la régulation des cycles biogéochimiques en servant de vecteur à la circulation du carbone, de l'azote ou encore du phosphore au sein des écosystèmes (Meybeck, 2003).

■ QUEL EST LE PROBLÈME ?

Le cycle de l'eau douce est massivement impacté par l'activité humaine : sur le plan quantitatif...

Le fait de capter et/ou détourner des sources d'eau naturelle pour répondre à des besoins humains est une pratique très ancienne que l'on retrouve dans de nombreuses civilisations. Mais si le phénomène n'est pas nouveau, il a pris une ampleur inédite depuis la révolution industrielle (cf. Figure 2). Au regard de la littérature scientifique, les auteurs des travaux sur les limites planétaires en déduisent que le cycle global de l'eau douce est entré dans l'anthropocène : d'une part parce que l'humanité est à présent devenue la principale source de modification du débit des rivières à l'échelle mondiale ; mais aussi parce qu'elle est le premier facteur de modification des flux d'évaporation. (Rockström et al., 2009)

Les activités humaines qui influencent les écoulements d'eau et l'évaporation prennent plusieurs formes. Par exemple :

- Le changement d'affectation des sols génère des pratiques comme le drainage des sols agricoles, l'assèchement des zones humides ou encore le changement de couverture végétale, qui entraînent par exemple une réduction de l'évapotranspiration et/ou de la rétention d'eau dans les sols, une modification des écoulements de surface ou encore une accélération de l'érosion.
- La construction d'ouvrages de stockage ou de régulation des débits d'eau, comme par exemple les barrages hydrauliques ou les canaux, modifient les régimes des cours d'eau naturels.
- La construction d'équipements de captage d'eau (pompage, réservoirs ou autres) réduit la quantité d'eau rendue aux milieux naturels et modifie l'équilibre hydrique des cours d'eau et des nappes phréatiques (Meybeck, 2003).

...et sur le plan qualitatif

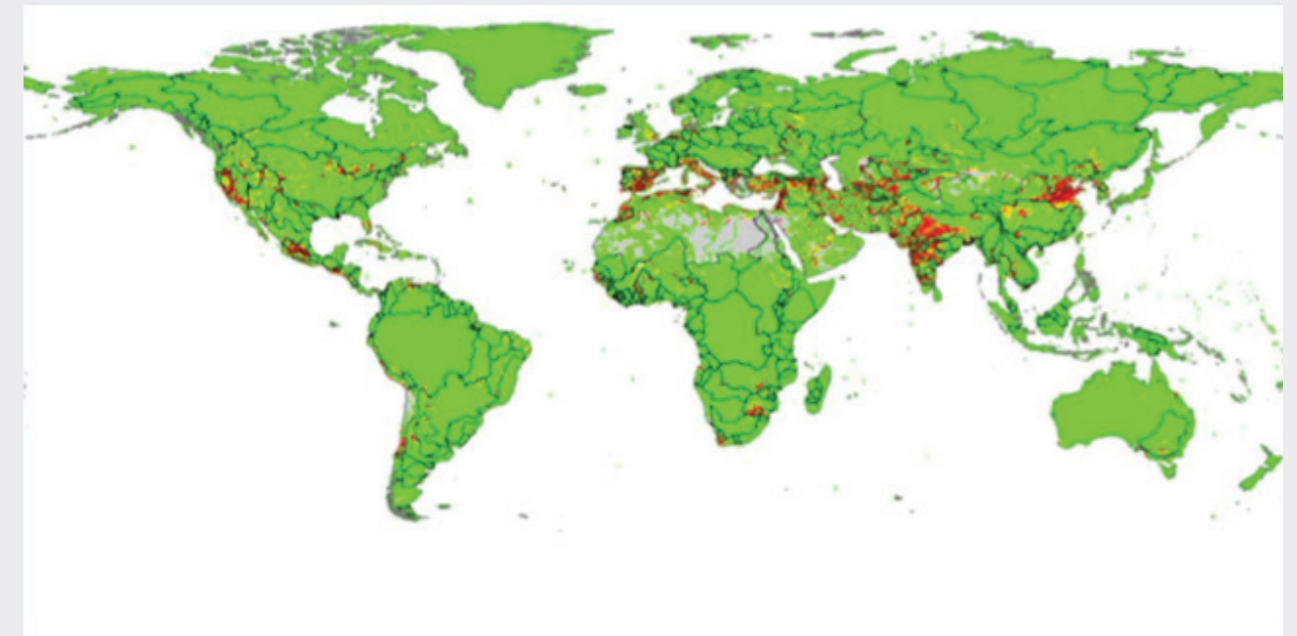
En plus de ces perturbations « quantitatives », il faut noter que de nombreuses pratiques humaines entraînent une dégradation de la qualité physico-chimique des eaux. Par exemple l'urbanisation, les pratiques agricoles, les activités minières et industrielles génèrent des pollutions de différentes sortes : matières organiques, sédiments, polluants chimiques et toxiques, plastiques, etc. Ces pollutions peuvent avoir de nombreux impacts négatifs sur la biodiversité ou la santé humaine. On notera toutefois que ce n'est pas cet aspect qualitatif qui est abordé par la littérature sur les limites planétaires, qui focalise son attention davantage sur les modifications quantitatives susmentionnées.

Ces perturbations ont des effets sur le fonctionnement du système Terre...

La modification du cycle de l'eau a plusieurs types d'impacts, dont on peut citer trois causes majeures :

- **La modification des écoulements** et les prélèvements dans les eaux de surface et les eaux souterraines ont des conséquences sur les milieux naturels et la biodiversité, du fait de la modification des écosystèmes (rivières, lacs, milieux humides) ; le cas le plus spectaculaire est peut-être la disparition de la mer d'Aral et de ses 28 espèces de poissons endémiques, conséquence d'un captage d'eau démesuré dans les affluents de la mer. Les prélèvements abusifs de ce type peuvent également mener à des tensions entre différents types d'usages

Figure 2 : L'utilisation de l'eau douce dans le monde (Steffen et al., 2015)
En rouge figurent les régions ayant dépassé le seuil de risque élevé pour la variable de contrôle régionale



Quel lien avec les autres processus planétaires ?

Les modifications du cycle de l'eau potable ont des effets directs sur **la biodiversité**, en particulier lorsque celle-ci affecte les milieux naturels comme les zones humides, les rivières ou encore les lacs. L'assèchement des zones humides est en effet une cause importante d'érosion de la biodiversité terrestre dans le monde.

Les interactions entre cycle de l'eau et climat sont nombreuses et complexes, le changement climatique étant à la fois cause et conséquence des modifications du cycle de l'eau. Par exemple, le changement climatique se traduit dans de nombreux endroits du globe par des périodes plus longues de sécheresse et/ou des pics de précipitations plus intenses (les « extrêmes climatiques » sont donc plus marqués). En France, par exemple, les scénarios de Météo France laissent entrevoir le fait que, dans les années à venir, on connaîtra à la fois des épisodes de sécheresse plus nombreux l'été, mais également un renforcement des précipitations extrêmes, générant des risques accrus d'inondations (Météo France, 2014)... De son côté, le cycle de l'eau influence le climat car la vapeur d'eau joue un rôle clé dans la régulation du climat : par exemple, la vapeur d'eau est à la fois un gaz à effet de serre mais aussi, grâce aux nuages, un élément qui modère le rayonnement solaire dans les basses couches de l'atmosphère. Au niveau local, la sécheresse de l'atmosphère favorise les conditions thermiques extrêmes, qui influent également l'intensité et la direction des vents, donc celle des nuages et des précipitations, si bien que les changements locaux se répercutent au niveau global.

Le changement d'affectation des sols est en partie responsable de ces bouleversements, puisque l'artificialisation et la déforestation modifient profondément les cycles de l'eau en réduisant l'infiltration dans les sols, en modifiant les écoulements de surface ou encore en réduisant l'évapotranspiration.

Enfin, l'eau est un élément important de la circulation des **cycles biogéochimiques de l'azote et du phosphore**. Le déséquilibre de ces deux cycles a un effet direct sur la qualité des eaux de surface (avec l'eutrophisation des milieux aquatiques) et des eaux souterraines (par exemple en rendant l'eau impropre à la consommation).

(agricoles, urbains, industriels) et entre territoires (en amont et en aval des bassins hydrographiques par exemple). On estime aujourd'hui que 25 % des bassins versants du globe s'assèchent avant de rejoindre l'océan du fait de la captation de l'eau douce en amont de leur embouchure (Molden et al., 2003, cités par Rockström et al., 2009).

- **La réduction de la teneur en eau contenue dans les sols et la végétation** est principalement due à la déforestation et à la dégradation du couvert végétal. C'est par exemple ce qui arrive lorsqu'on remplace un couvert forestier par un espace de monoculture. Cette chute du volume d'eau disponible dans les sols et la biomasse amène souvent à accroître le recours à l'irrigation, et donc les prélèvements dans les eaux de surface ou souterraines (avec les conséquences évoquées dans le paragraphe précédent).

- **La modification de l'évapotranspiration**, qui est également en grande partie liée aux modifications du couvert végétal, a quant à elle des effets sur le climat local puisque la réduction de l'évapotranspiration se traduit notamment par un assèchement de l'atmosphère et une augmentation de la température près du sol. Mais elle peut également avoir un impact sur le climat global puisque l'évapotranspiration joue un rôle de régulation des transferts d'eau de la biosphère vers l'atmosphère. Par exemple, en forêt tropicale, 50 à 80 % de l'eau transpirée et présente dans l'air sous forme d'humidité demeure dans le cycle de l'eau de l'écosystème forestier. La déforestation réduit l'humidité et les précipitations, jusqu'à influencer le régime des moussons.

■ QUELLE EST LA VARIABLE DE CONTRÔLE RETENUE ?

Dans leur article original, Johan Rockström et ses collègues notent qu'une limite planétaire pour les ressources en eau douce suppose de prendre en compte plusieurs fonctions : assurer des flux d'eau verte (cf. encadré) suffisants pour assurer l'évaporation nécessaire au renouvellement des précipitations, permettre le bon fonctionnement des écosystèmes terrestres ou encore assurer la disponibilité d'eau bleue nécessaire aux écosystèmes aquatiques. (Rockström et al., 2009) En première approche, c'est le **volume total d'eau douce prélevé dans les eaux de surface et les eaux souterraines** (renouvelables) qui a été retenu comme variable de contrôle.

■ QUELLE EST LA FRONTIÈRE PLANÉTAIRE ?

4 000 km³ d'eau douce prélevée par an

En se fondant sur la littérature existante, les auteurs des articles sur les limites planétaires constatent que la quantité maximale d'eau bleue (cf. encadré) accessible est de 12 000 à 15 000 km³/an au niveau mondial, avec une limite de pénurie physique bien plus basse, aux alentours de 5 000 à 6 000 km³/an (notamment parce qu'il faut préserver 20 à 50 % des débits d'eau moyen pour maintenir le fonctionnement des écosystèmes aquatiques). Ils considèrent par conséquent qu'au-delà de 4 000 km³ d'eau prélevée chaque année au niveau mondial, le risque de dysfonctionnement est accru.

Ce seuil étant mondial, et les volumes d'eau douce (eau bleue) disponibles sur Terre étant très hétérogènes, des dépassements sont toutefois possibles à l'échelle de certains bassins versants sans pour autant que la limite planétaire soit franchie : comme évoqué précédemment, d'ores et déjà un quart des bassins versants du globe voient leurs principales rivières s'assécher avant même de rejoindre l'océan – par exemple sur une partie du pourtour méditerranéen. Une frontière est donc proposée à l'échelle des bassins versants : le prélèvement mensuel à des fins humaines ne devrait pas dépasser 25 % du flux mensuel moyen d'eau durant les périodes d'étiage (et pourrait monter à 55 % de ce flux mensuel moyen lors des saisons où le débit est le plus fort). (Steffen et al., 2015)

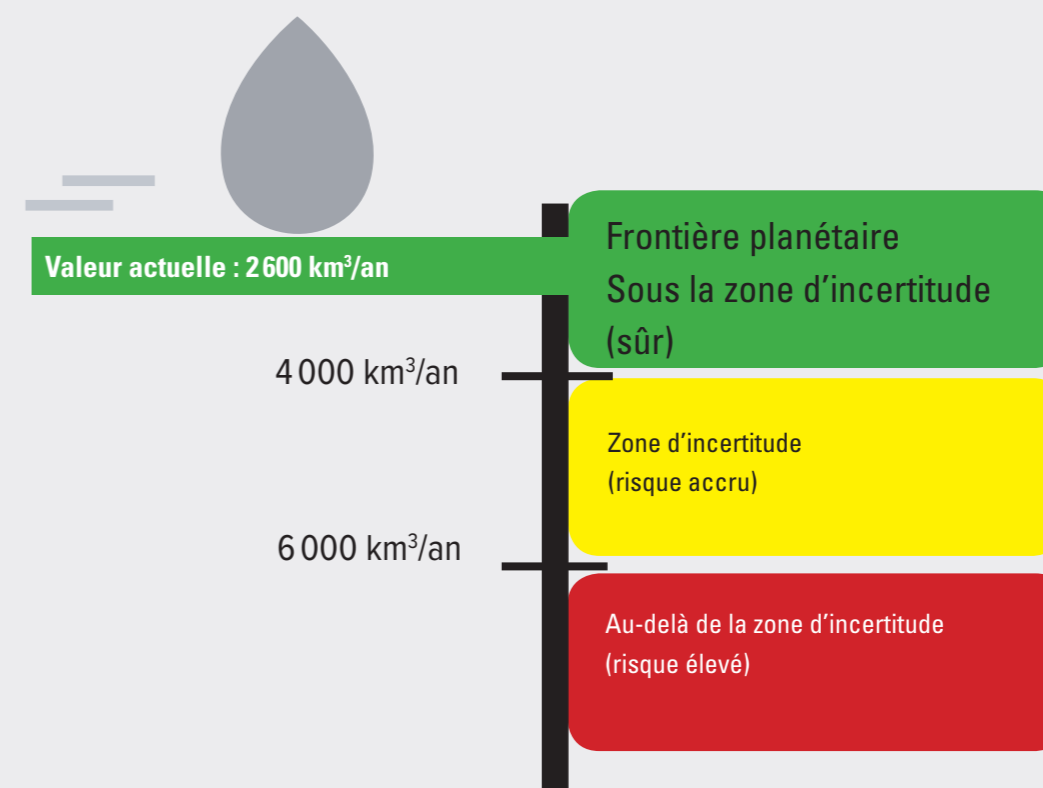


L'« eau verte » et de l'« eau bleue »

Dans la littérature scientifique, il est couramment fait référence aux notions d'« eau bleue » et d'« eau verte » pour désigner les différents types d'eau qui peuvent potentiellement être mobilisés par l'humanité afin de répondre à ses besoins de production et de consommation :

- L'eau verte correspond à l'eau issue des précipitations qui est utilisée par les végétaux (et les animaux) afin de croître.
- L'eau bleue désigne les eaux de surface (lacs, rivières, réservoirs) ou souterraines (nappes phréatiques) qui peuvent être prélevées par l'humanité à des fins diverses comme par exemple l'irrigation, l'alimentation des populations en eau potable, l'industrie, etc.

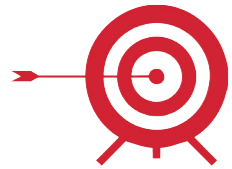
Par exemple, la production d'un kilogramme de viande de bœuf requiert en moyenne environ quinze mille litres d'eau, majoritairement constituée d'eau verte (précipitations nécessaires à la croissance des végétaux), et plus marginalement d'eau bleue (irrigation des cultures et consommation des animaux, pour environ 500 litres). (Hoekstra & Mekonnen, 2012).



■ QUELLE EST LA VALEUR ACTUELLE ? 2 600 km³ d'eau douce prélevée/an

Au niveau mondial, le volume total d'eau douce (eau bleue) prélevé chaque année par l'humanité s'élève à environ 2 600 km³ par an. Bien qu'elle soit en-dessous de la limite proposée, cette valeur doit néanmoins être considérée de manière prospective car les besoins agricoles à l'horizon 2030 devraient nécessiter l'augmentation de 25 à 50 % des volumes d'eau prélevés pour l'agriculture, ce qui pour ce seul secteur supposerait un accroissement de 400 à 800 km³ d'eau (Rockström et al., 2007).

Par ailleurs, de nombreuses régions du monde prélèvent d'ores et déjà davantage d'eau douce que le seuil proposé par bassin versant, menant à des dégradations des écosystèmes aquatiques ou des changements des microclimats des régions concernées : par exemple autour du bassin méditerranéen, en Inde, en Asie du Sud-Est, en Afrique du Nord et du Sud ou encore sur la côte ouest de l'Amérique du Nord.



QUE PEUT-ON FAIRE ?

Au niveau mondial, on observe une tendance inverse entre pays développés et en voie de développement : les prélèvements d'eau se stabilisent (voire baissent légèrement) dans les premiers tandis qu'ils augmentent dans les seconds. En revanche, les pays riches « importent » de plus en plus d'eau incorporée dans les produits qu'ils importent, utilisant ainsi indirectement l'eau des pays en développement. Au total, on observe un accroissement des prélèvements d'eau d'environ 1 % par an depuis la fin des années 1980 au niveau mondial. L'agriculture utilise environ 70 % de ces prélèvements, suivie de l'industrie (20 %) et de l'usage domestique (10 %). (WWDR, 2014 ; CIEau, non daté)

Favoriser les usages économes en eau

Le secteur le plus consommateur d'eau dans le monde étant de loin l'agriculture, il est primordial de contenir l'accroissement de ses prélèvements. Cela suppose d'éviter les productions agricoles fortes consommatrices d'eau, notamment dans les régions qui ne sont pas adaptées à leur culture et qui obligent à développer l'irrigation (en particulier par pompage dans les eaux de surface ou souterraines). En guise d'exemple, on retiendra que la production d'un kg de viande de bœuf requiert en moyenne 15 000 litres d'eau, dont un peu plus de 500 litres d'eau d'irrigation, avec des rendements qui peuvent fortement varier d'une région à une autre : par exemple, la production de plantes fourragères comme le maïs nécessitera davantage d'irrigation dans une région où les précipitations sont habituellement faibles en été. (Mekonen & Hoekstra, 2012) L'autre piste consiste à améliorer l'efficacité de l'usage de l'eau, par exemple en développant les techniques de type goutte-à-goutte (micro-irrigation), en cultivant des variétés adaptées au climat local, en favorisant la rotation des cultures ou encore en mobilisant des pratiques agricoles qui conservent le couvert végétal ou ne nécessitent pas le labour (comme l'agriculture dite de conservation ou encore l'agro-écologie).

Favoriser la circulation du cycle de l'eau dans l'aménagement du territoire

Le changement d'affectation des sols est une cause majeure de perturbation du cycle de l'eau. Lorsqu'elle est pratiquée à grande échelle, la déforestation modifie considérablement le cycle de l'eau et le climat local ; cela se vérifie particulièrement en climat tropical, où non seulement le développement agricole accroît les besoins d'irrigation, mais génère également une perturbation majeure du cycle de l'eau. Freiner la déforestation et s'attaquer à ses causes est donc primordial (cf. fiche « Le changement d'affectation des sols » pour ce qui concerne les pistes de solution).

En quoi l'agglomération lyonnaise est-elle concernée ?



Favoriser l'infiltration dans les sols

Le cycle de l'eau est particulièrement perturbé dans les aires urbaines comme les métropoles, dont les sols sont très largement imperméabilisés. Faute de pouvoir s'infiltrer localement, les eaux ruissellent alors en surface et rejoignent les cours d'eau. Le climat local est également profondément impacté par l'imperméabilisation des sols avec les phénomènes d'îlots de chaleur urbain. La lutte contre l'artificialisation des sols est donc un enjeu très important pour le Grand Lyon, puisque 58,3 % des sols sont artificialisés en 2015, soit 5 % de plus qu'en 2000. (Grand Lyon, 2019) Les démarches visant à développer les trames vertes et bleues (cf. fiche « Les menaces sur l'intégrité de la biosphère ») et à développer la canopée (cf. fiche « Le changement d'affectation des sols ») devraient permettre d'améliorer la situation ou, tout du moins, de freiner l'artificialisation. La Métropole s'est engagée depuis 1995, à réduire l'imperméabilisation à travers une politique de gestion à la source des eaux pluviales (déconnectées du système d'assainissement qui dysfonctionne par temps de pluie). Soutenus financièrement par l'Agence de l'Eau depuis 2016, les projets d'aménagement publics (Métropole, SPL part Dieu, SPL Confluence, SYTRAL, Universités) et privés (bailleurs) du territoire ont permis la désimperméabilisation de 38 hectares. Le plan local d'urbanisme en cours d'approbation exigera la gestion à la parcelle des eaux pluviales (infiltration ou rejet au cours d'eau). Le futur PCAET engagera la Métropole dans un programme de désimperméabilisation encore plus ambitieux. Dans les périmètres de protection des captages, le maintien des espaces naturels et agricoles est privilégié et les conditions d'infiltration dans les zones urbanisées sont réglementées pour limiter les risques de pollution des nappes souterraines.

Maîtriser les consommations d'eau

La métropole dispose sur son territoire de ressources en eau potable relativement abondantes et de qualité. Du fait de son caractère urbain et de la faible présence de l'agriculture, la majorité de l'eau utilisée sur le territoire est distribuée dans les réseaux d'adduction d'eau potable. Ce sont les usages domestiques qui sont les plus importants. Or, malgré une croissance démographique marquée, les prélèvements d'eau se sont stabilisés depuis le début des années 2000, d'une part grâce à une amélioration de la qualité des réseaux (moins de pertes), mais aussi du fait d'une légère baisse des consommations des ménages et des entreprises (tendance par ailleurs constatée sur le reste du territoire national ; EauFrance, 2017). Cette maîtrise de la consommation est une bonne nouvelle, mais elle doit être pérennisée dans le temps, notamment parce que le changement climatique va probablement modifier le régime du Rhône au cours des décennies à venir, alors même que ce dernier influe directement la principale nappe phréatique qui approvisionne aujourd'hui la métropole. Le niveau d'étiage du Rhône (c'est-à-dire son niveau minimal) pourrait alors advenir à la fin du printemps, au moment même où l'on constate aujourd'hui le pic de consommation annuel. Pour anticiper ces évolutions, la Métropole cherche à diversifier ses ressources d'approvisionnement en eau, à améliorer le rendement du réseau et à sensibiliser les consommateurs aux économies d'eau (compteurs communicants et programme de sensibilisation qui vise à réduire les consommations d'énergie et d'eau des ménages avec l'Agence Locale de l'Energie et du Climat).

Réduire l'empreinte eau des habitants

À l'instar de nombreuses limites planétaires, le territoire métropolitain a un impact indirect sur le cycle de l'eau mondial à travers les consommations de ses habitants qui sont importées dans la métropole, mais qui mobilisent sur leurs lieux de production des quantités parfois très importantes d'eau. Faire connaître aux consommateurs l'impact de leurs consommations quotidiennes sur le cycle de l'eau est une manière de les inciter à agir. Le café a par exemple une empreinte aquatique beaucoup plus importante que le thé, le coton a besoin de davantage d'eau que le lin ou le chanvre, la viande de bœuf nécessite deux fois plus d'eau bleue que celle de volaille, etc. (Mekonen & Hoekstra, 2012).

Dans les pays industrialisés du Nord, c'est davantage l'artificialisation des sols qui perturbe aujourd'hui les cycles de l'eau. Freiner l'imperméabilisation est donc un impératif. Il faut également permettre une meilleure infiltration de l'eau dans les sols, à la fois dans les surfaces agricoles (pratiques agricoles adaptées, plantation de haies, etc.) mais aussi en « désimperméabilisant » les sols des villes afin de favoriser l'infiltration des eaux de pluie (limitation des surfaces imperméables, fossés d'infiltration, végétalisation, etc.). (France Libertés, 2015)

BIBLIOGRAPHIE

- EauFrance, 2017. Bulletin n° 2. Prélèvements quantitatifs sur la ressource en eau, données 2013. - http://www.eaufrance.fr/IMG/pdf/bnpe_2013_201703.pdf
- France Libertés, 2015. « Eau et climat : rendons à la terre pour restaurer le climat », Ed. France libertés, Paris.
- Grand Lyon, 2019. « L'observatoire métropolitain du développement durable. Où en est le territoire de la métropole de Lyon ? », Grand Lyon, Agence d'urbanisme urbalyon.
- Mekonen M.M., Hoekstra A.Y., 2012. « A global Assessment of the Water Footprint of Farm Animal Products » Ecosystems, n°15, pp. 401-415. - <https://waterfootprint.org/media/downloads/Mekonnen-Hoekstra-2012-WaterFootprintFarmAnimalProducts.pdf>
- Meybeck M., 2003. « Global analysis of river systems: from Earth system controls to Anthropocene syndromes » Philosophical Transactions of the Royal Society. Series B Biological Sciences, vol. 358, pp. 1935-1955
- Rockström, J., Falkenmark M., Lannerstad M., 2007. « Assessing the water challenge of a new green revolution in developing countries » Proceedings of the National Academy of Sciences 104, pp. 6253–6260.
- Wikimedia Commons, non daté. « Cycle de l'eau », visité pour la dernière fois le 23 mai 2019. - https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cycle_de_l'eau.png
- WWDR, Unesco, 2014. « Eau et énergie, faits et chiffres. Rapport mondial des nations-Unies sur les ressources en eau 2014 ». UN Water Report, Pérouse. - <http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/HQ/SC/images/FFbrochureFrench.pdf>



L'APPAUVRISSEMENT DE LA COUCHE D'OZONE STRATOSPHERIQUE

■ QU'EST-CE QUE C'EST ?

La couche d'ozone stratosphérique constitue une protection vitale contre les rayonnements nocifs du soleil

L'atmosphère terrestre se compose de plusieurs couches : la troposphère (basses couches), la stratosphère, la mésosphère et enfin la thermosphère. L'ozone (O_3) est présent en très faible quantité dans l'atmosphère (cf. Figure 1). Pour autant, la présence d'ozone dans la stratosphère (entre 20 et 40 km d'altitude environ) est absolument vitale car elle protège la basse atmosphère des rayons ultraviolets du soleil. Ces derniers étant extrêmement nocifs pour les organismes vivants, l'apparition de la vie en dehors des océans n'a été rendue possible que suite à la constitution de cette barrière qui protège la surface terrestre des rayonnements ultraviolets

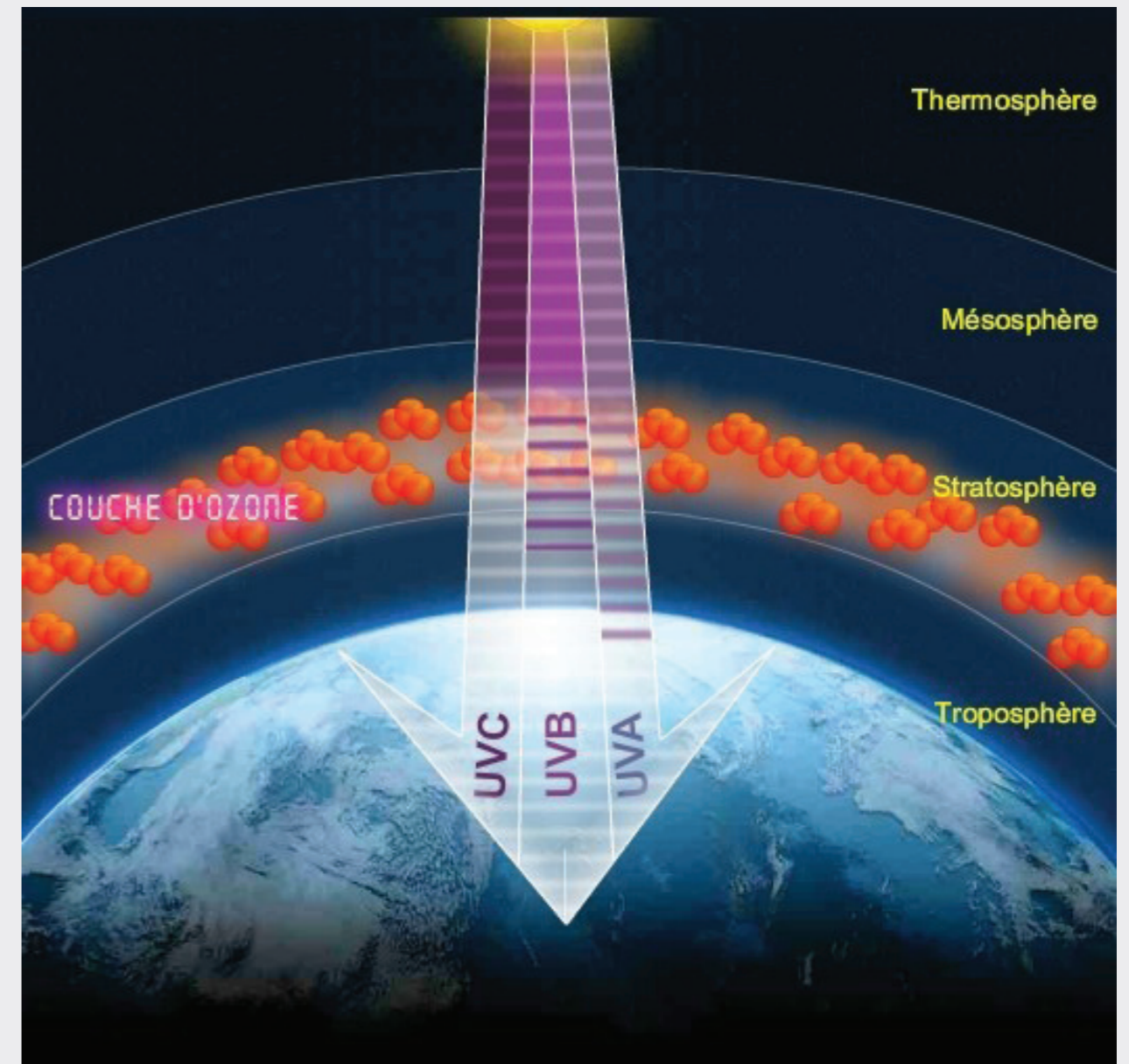
Une « couche » dont l'épaisseur est en équilibre dynamique

La notion de « couche » est en réalité assez trompeuse : l'ozone n'est en effet présent dans la stratosphère que de manière très dispersée et en faible quantité, de l'ordre de quelques dizaines de parties par million (ppm) – ce qui équivaut en moyenne à quelques millimètres d'épaisseur d'ozone pure dans des conditions normales de pression et de température. La présence de l'ozone dans la stratosphère est le résultat d'une réaction chimique : à partir d'une certaine altitude, le rayonnement solaire casse certaines molécules de dioxygène (O_2). Les atomes d'oxygène (O) ainsi libérés vont alors s'associer à d'autres molécules de dioxygène pour former de l'ozone (O_3). Cette formation est plus intense là où le rayonnement solaire est plus fort, ce qui explique que, malgré les mouvements des masses d'air stratosphériques, la présence d'ozone (ou pour le dire autrement « l'épaisseur de la couche d'ozone ») est plus importante au niveau de l'équateur qu'au niveau des pôles.

Enfin, il faut noter que la quantité d'ozone dans l'atmosphère est naturellement stable parce que ce processus de production d'ozone est compensé par des processus de destruction. Par exemple, l'ozone se décompose spontanément aux pôles durant l'hiver, car l'absence de soleil favorise la recombinaison des atomes d'oxygène (O) et des molécules d'ozone (O_3) en dioxygène (O_2). Par ailleurs, certaines molécules azotées et chlorées (produites naturellement dans les océans par les algues, par certaines bactéries ou lors d'éruptions volcaniques) participent également à ce phénomène de destruction lorsqu'elles rejoignent la stratosphère : les molécules chlorées entraînent par exemple une réaction catalytique qui détruit les molécules d'ozone.

Figure 1 : Comportement de la couche d'ozone vis-à-vis des rayons ultraviolets (UV)
(cité par Météo France, non daté)

On considère trois types d'UV, classés en fonction de leurs longueurs d'onde : les UV-A, B et C. Du fait de sa bande d'absorption dans le domaine des longueurs d'onde (comprise entre 200 et 300 nm), l'ozone absorbe l'intégralité des UV-C, une très grande proportion des UV-B, mais une partie seulement des UV-A.



■ QUEL EST LE PROBLÈME ?

Le « trou » dans la couche d'ozone témoigne d'un déséquilibre entre production et destruction d'ozone stratosphérique

À partir du milieu des années 1980, les mesures réalisées dans l'atmosphère terrestre montrent une érosion sensible de l'épaisseur de la couche d'ozone stratosphérique depuis les années 1970 (cf. Figure 2), en particulier au pôle sud où le phénomène d'amincissement de la couche en hiver est plus prononcé qu'au pôle nord – notamment à cause de l'absence de rayonnement solaire durant cette période (cf. ci-avant). Le « trou » (qui est en réalité un amincissement de la couche, ou plus précisément une diminution de la concentration d'ozone stratosphérique aux pôles) devient à la fois plus grand (surface) et plus « profond » (épaisseur). Ce phénomène traduit un déséquilibre entre production et destruction d'ozone, qui concerne l'ensemble de la couche mais s'avère plus visible au niveau du pôle sud.

Un phénomène lié à l'accroissement des rejets de molécules chlorées dans l'atmosphère

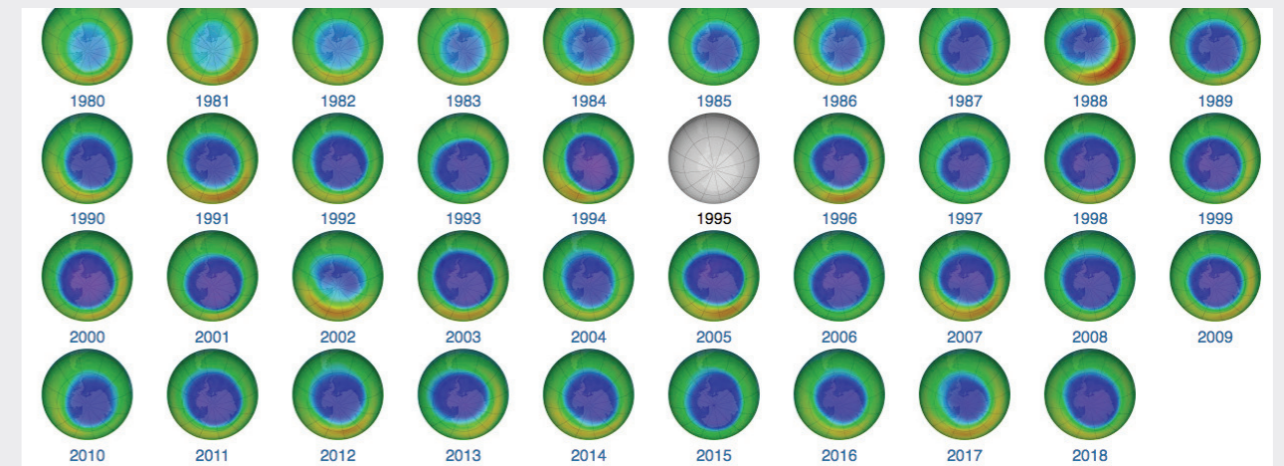
Dès 1985, les scientifiques expliquent ce phénomène par l'accroissement des teneurs dans la stratosphère en substances appauvrissant la couche d'ozone (dites SAO). Ce sont plus particulièrement les molécules chlorées qui sont alors pointées du doigt (Farman et al., 1985). On estime en effet que la teneur naturelle de l'atmosphère en chlore (essentiellement issu des océans) est de l'ordre de 0,6 milliardième, alors qu'elle atteint aujourd'hui près de 4 milliardièmes, soit une multiplication par presque sept en quelques décennies. La principale cause de cet accroissement est la production industrielle de chlorofluorocarbures (CFC) qui a explosé dans la seconde moitié du XX^e siècle. Entre 1960 et 1990, la quantité de gaz chlorés émis dans l'atmosphère a ainsi été multipliée par 5, passant de 0,3 à 1,5 million de tonnes de CFC-11eq/an*. (WMO, 2018) Molécules particulièrement stables et ininflammables, ces CFC ont été utilisés dans l'industrie comme propulseurs dans les bombes aérosols, comme liquide refroidissant dans les appareils ménagers (notamment le CFC-11 plus connu sous le nom de fréon), comme solvants dans l'industrie électronique ou encore comme agents extincteurs. Une fois émises dans l'atmosphère, ces molécules chlorées vont progressivement migrer vers la stratosphère où les photons de lumière vont les dissocier, accélérant ainsi le processus de destruction de l'ozone stratosphérique en provoquant des effets en chaîne : raison pour laquelle d'infimes concentrations de chlore suffisent à avoir des effets dévastateurs sur la couche d'ozone. (cf. Figure 3)

Des conséquences potentiellement catastrophiques

L'érosion de la couche d'ozone peut avoir des conséquences dramatiques pour la vie sur Terre. D'abord parce qu'une diminution de la couche d'ozone entraîne une plus forte exposition à certains rayons ultraviolets : cette exposition est deux fois plus importante que l'érosion de la couche elle-même (par exemple, une diminution de 10 % de la couche d'ozone entraîne un accroissement d'environ 20 % des UV-B qui parviennent au sol). Or une exposition accrue aux rayons UV peut provoquer plusieurs types de cancer et affaiblir le système immunitaire : l'OMS estime ainsi qu'une diminution de 10 % de la concentration d'ozone stratosphérique provoquerait dans le monde environ 300 000 cancers cutanés chaque année, 4 500 mélanomes et près de 2 millions de cas de cataracte supplémentaires (OMS, non daté). Les UV ont également un effet néfaste sur les écosystèmes : ils impactent la photosynthèse et la croissance des plantes et des phytoplanctons, et nuisent également au cycle de vie de nombreux animaux. Certains cycles biogéochimiques sont également potentiellement affectés. Le trou dans la couche d'ozone est également suspecté d'impacter négativement le changement climatique.

* Les différentes substances dites SAO sont agrégées en fonction de leur potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone, afin d'obtenir une unité de mesure commune exprimées en équivalent CFC-11, noté CFC-11_{eq}.

Figure 2 : Le trou d'ozone au mois d'octobre depuis 1980 dans l'hémisphère sud (NASA, 2018)



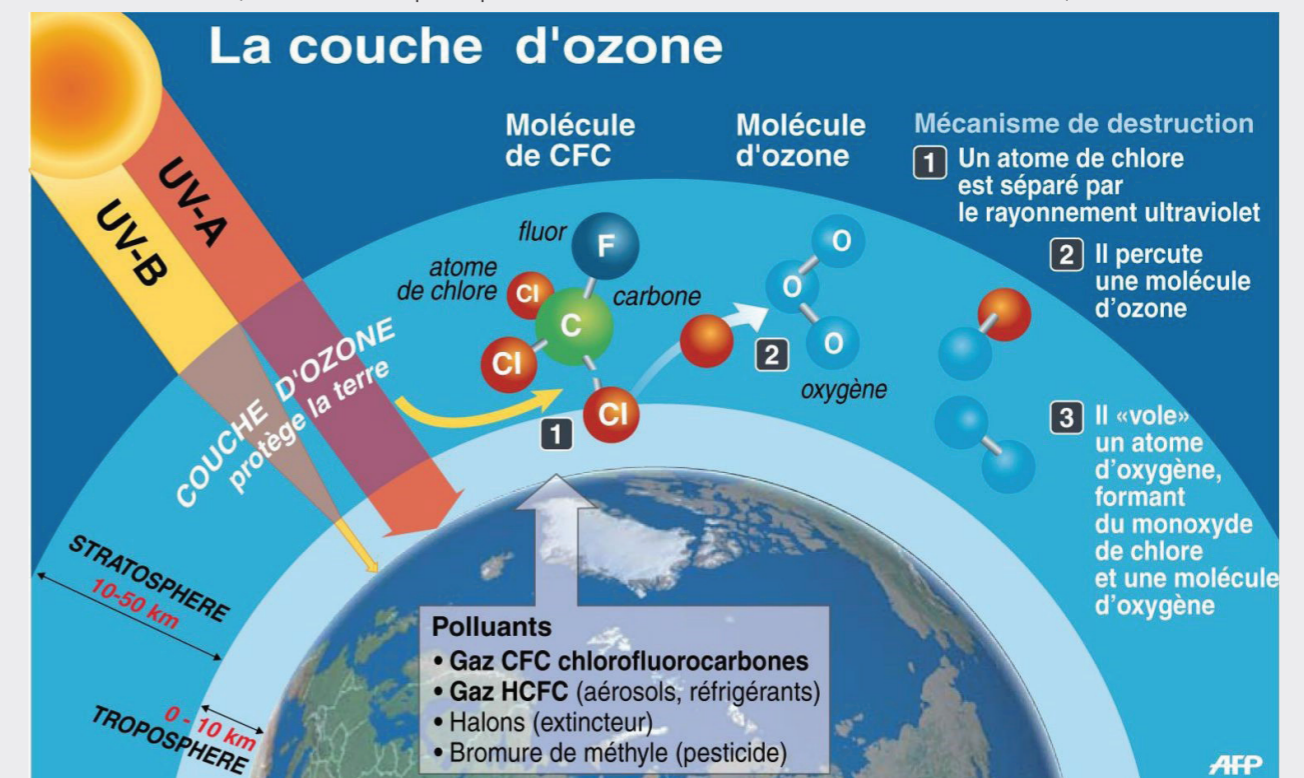
Le mécanisme de destruction de la couche d'ozone

Le processus de destruction agit ainsi : après avoir migré pendant plusieurs années ou décennies des basses couches de l'atmosphère (où le CFC est inerte) vers la stratosphère, les molécules de CFC subissent alors les radiations UV qui rendent le chlore actif, générant une réaction en chaîne au contact avec l'ozone (un atome de chlore interagit avec une molécule d'ozone pour lui arracher un atome d'oxygène, laissant alors

une molécule de dioxygène ; puis un atome d'oxygène atteint alors le monoxyde de chlore, formant du dioxygène et du chlore... chlore qui attaque alors une autre molécule d'ozone, etc.). La réaction est dite catalytique, c'est à dire que le composé chloré provoque la réaction sans être consommé : une seule molécule de chlore peut ainsi détruire plusieurs milliers de molécules d'ozone.

Figure 3 : Le mécanisme de destruction de la couche d'ozone par les molécules de CFC

(Source AFP, citée par Inspir'action, 2016 - Crédit : I.Saubadu/a.Bommenel LS/PP/ABM)



■ QUELLE EST LA VARIABLE DE CONTRÔLE RETENUE ?

La concentration en ozone dans l'atmosphère est mesurée en unités Dobson (UD). Une UD équivaut à une épaisseur de 10 micromètres (0,01 mm) d'ozone dans des conditions normales de température et de pression. Par exemple, une valeur de 300 UD signifie que la quantité cumulée d'ozone de la stratosphère équivaut à une épaisseur de 3 mm.

■ QUELLE EST LA FRONTIÈRE PLANÉTAIRE ? 275 UD

La valeur proposée équivaut à 95 % de la valeur préindustrielle, estimée à 290 UD : soit 275 UD. (cf. Figure 4)

■ QUELLE EST LA VALEUR ACTUELLE ? 285 UD

Au cours des dernières années, la valeur constatée était en moyenne située entre 280 et 285 UD.

La nette érosion de la couche d'ozone entamée dans les années 1970-80 semble avoir connu un terme au début des années 1990, période à laquelle la valeur seuil de 275 UD a failli être transgressée. Depuis, les valeurs moyennes ont légèrement progressé, témoignant d'une reconstruction progressive de la couche d'ozone. Un retour au niveau préindustriel est anticipé pour le milieu du XXI^e siècle (WMO, 2018).

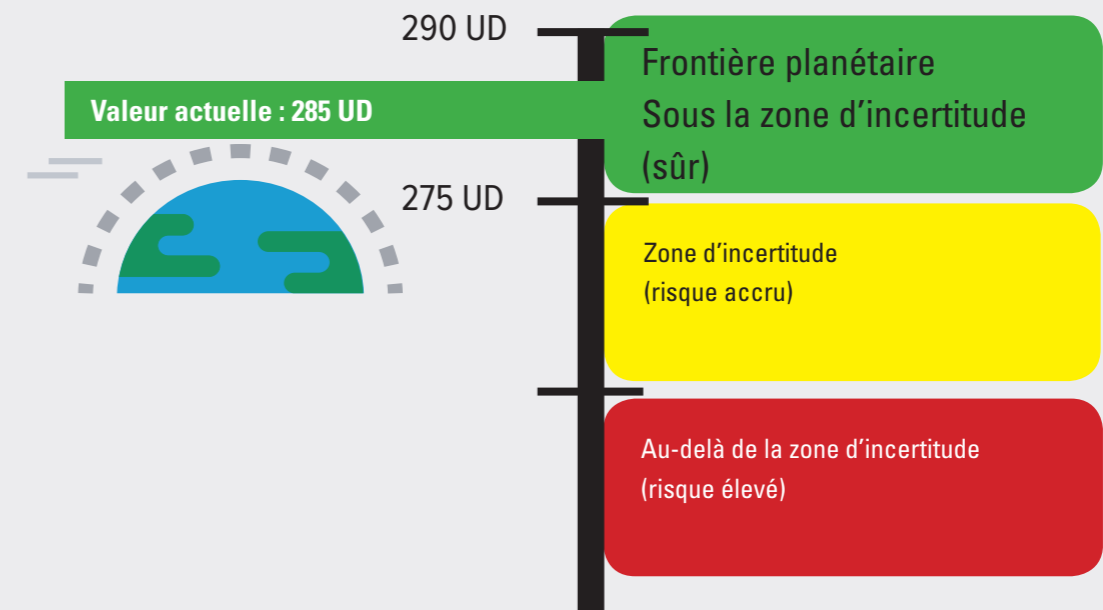
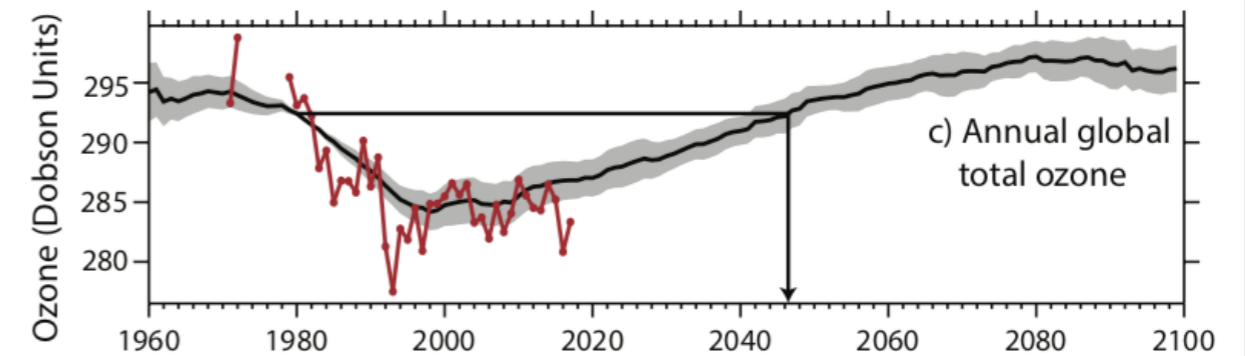
La frontière planétaire proposée n'est transgressée que de manière ponctuelle et régionale, en particulier au début du printemps dans la région de l'Antarctique. C'est en effet à cette époque et à cet endroit que la concentration d'ozone stratosphérique est généralement la plus faible, descendant sous la barre des 200 UD. Mais ce fameux phénomène de « trou » dans la couche d'ozone semble lui aussi s'être stabilisé, voire même atténué.

Quel lien avec les autres processus planétaires ?

En accroissant le rayonnement ultraviolet, le trou dans la couche d'ozone a des effets de plusieurs types sur la **biodiversité**. La surexposition d'UV-B altère la photosynthèse et réduit la productivité de nombreuses plantes et du phytoplancton, à la base de la chaîne trophique. Le fait que certaines espèces soient plus sensibles que d'autres est également susceptible de provoquer des bouleversements dans l'équilibre de nombreux écosystèmes, même s'il est très difficile d'anticiper ces effets (par exemple dans les milieux aquatiques, Hader et coll., 2007). Une baisse de la productivité du phytoplancton pourrait par exemple avoir un effet sur le cycle du carbone en réduisant la capacité d'absorption biologique du CO₂ atmosphérique par les océans, et ainsi renforcer l'effet de serre.

Concernant le **changement climatique**, la diminution de la couche d'ozone a des effets notables sur le climat au niveau stratosphérique et serait responsable d'un tiers du réchauffement observé à cette échelle. Ses effets dans les basses couches de l'atmosphère sont en revanche moins nets, même si elle pourrait expliquer une partie des changements climatiques observés dans l'hémisphère Sud en été. La lutte contre le « trou » de la couche d'ozone a des effets globalement positifs sur le changement climatique car certains gaz SAO comme les CFC sont également de puissants gaz à effet de serre (GES). Il est à noter que certains gaz de substitution des CFC, comme les HFC (hydrofluorocarbures), sont également des GES : ils ont un potentiel de réchauffement global plus faible que les CFC, mais ils sont en forte augmentation et pourraient devenir un facteur non négligeable de changement climatique à l'avenir (WMO, 2018).

Figure 4 : Évolution de l'épaisseur moyenne globale de la couche d'ozone en unités Dobson mesurée en rouge et estimée jusqu'à 2100 en noir (WMO, 2018)





QUE PEUT-ON FAIRE ?

Continuer à respecter les engagements du protocole de Montréal...

Will Steffen et ses collègues notent à propos de la couche d'ozone qu'il s'agit d'un « *exemple où, après qu'une limite ait été transgressée localement, l'humanité a mis en place des actions efficaces afin d'inverser la tendance et de revenir à l'intérieur de la limite.* » (Steffen et al., 2015) De fait, l'humanité a très vite réagi et mis en œuvre des actions : peu de temps après l'alerte sonnée par les scientifiques (1985) la plupart des nations du globe ont signé en 1987 le protocole de Montréal, qui engageait l'humanité dans un processus de réduction des émissions de SAO dans l'atmosphère.

Les engagements de réduction ont été globalement tenus à l'échelle mondiale, avec toutefois quelques déconvenues : ainsi, la production de CFC-11 (fréon) devait être prohibée après 2010. Or si sa production déclarée est effectivement quasiment nulle aujourd'hui, des mesures récentes montrent que ses émissions se sont à nouveau accrues, suggérant l'existence d'une importante production illégale. D'où l'importance de maintenir (et vérifier) les engagements, qui consistent notamment à ne plus utiliser de SAO comme gaz propulseurs, à améliorer l'étanchéité des systèmes de réfrigération ou encore à récupérer puis recycler (ou détruire) les fluides réfrigérants.

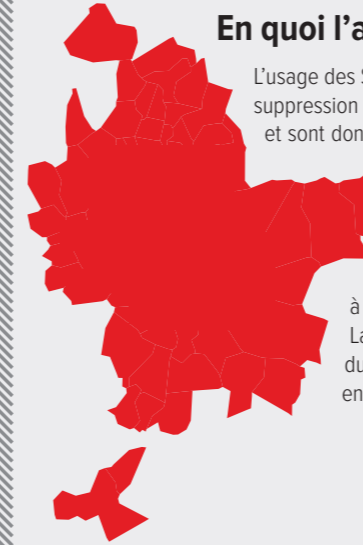


Après le protocole de Montréal, l'amendement de Kigali sur les HFC

Les CFC ont été remplacés par l'industrie, dans un premier temps par des HCFC (hydrochlorofluorocarbone) puis par des hydrofluorocarbures (HFC), qui n'ont plus d'impact vis-à-vis de la couche d'ozone (du fait de l'absence de chlore) mais sont en revanche de puissants gaz à effet de serre. En 2016, l'amendement de Kigali au protocole de Montréal a été signé par 196 états afin de réduire l'utilisation des HFC. Les pays dits « développés » se sont engagés à réduire de 45 % l'usage des hydrofluorocarbures (HFC) d'ici 2024 et de 85 % d'ici 2036, par rapport à la période 2011-2013 servant de référence. Les acteurs

industriels et de la grande distribution doivent donc aujourd'hui abandonner les HFC également. Les secteurs concernés sont notamment la réfrigération industrielle et commerciale, la climatisation et les pompes à chaleur individuelles, les transports frigorifiques. Les acteurs concernés ont plusieurs choix technologiques possibles pour cela : hydrocarbures (R600a, isobutane, utilisé dans les réfrigérateurs à usage domestique, mais qui sont potentiellement inflammables), CO₂ à haute pression ou ammoniac, un gaz toutefois potentiellement dangereux, toxique et irritant.

En quoi l'agglomération lyonnaise est-elle concernée ?



L'usage des SAO est aujourd'hui étroitement encadré par la réglementation internationale et nationale, qui vise à leur suppression progressive. Certaines industries du territoire produisent des gaz destinés aux circuits de climatisation et sont donc directement concernées par ces réglementations. Par ailleurs, les metteurs sur le marché de produits contenant des fluides frigorigènes (réfrigérateurs et pompes à chaleur, gestion des circuits anciens de pompes à chaleur enterrés, etc.) ont la responsabilité de prendre en charge la collecte de ces équipements en fin de vie via un éco-organisme. Le grand public est ainsi invité à renvoyer les appareils usagés lors de la livraison d'un appareil neuf (1 pour 1), ramener ces appareils dans les magasins qui les vendent ou dans les déchetteries. Fabricants, distributeurs et pouvoirs publics peuvent s'engager à mieux informer le grand public sur la collecte, le retraitement et/ou la destruction des fluides frigorigènes. La bonne application de ces règles est en effet une condition sine qua non du respect des engagements du protocole de Montréal. Elle peut également accompagner les acteurs du territoire dans le respect des engagements de l'amendement de Kigali.

BIBLIOGRAPHIE

- Farman, J. C., Gardiner, B. G., Shanklin, J. D., 1985. « Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClOx/NOx interaction », *Nature*, n°315, pp. 207-210.
- Hader et al., 2007. « Effects of solar UV radiation on aquatic ecosystems and interactions with climate change » *Photochem. Photobiol. Sci.*, 2007, n°6, pp. 267–285. - http://www.ciesin.org/documents/UNEPparticle_worrest.pdf
- Inspir'Action, 2016. « Réduction du trou dans la couche d'ozone, selon une étude », mis en ligne sur le site d'Inspir'Action le 21 juillet 2016. - <http://www.inspiration.news/fr/2016/07/21/reduction-du-trou-dans-la-couche-d-ozone-selon-une-etude/>
- Météo France, non daté. « L'évolution du climat – Les effets de la couche d'ozone. » Dossier mis en ligne sur le site de MétéoFrance, non daté. - <http://education.meteofrance.fr/dossiers-thematiques/l-evolution-du-climat/les-effets-de-la-couche-d-ozone/les-effets#>
- NASA, 2018. « Ozone Hole Watch ». - https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/monthly/monthly_1979-09.html#dailies
- OMS, non daté. « Effets du rayonnement UV sur la santé » mis en ligne sur le site de l'OMS, non daté. - https://www.who.int/uv/uv_and_health/fr/
- WMO – World Meteorological Organization / Global Ozone Research and Monitoring Project, 2018. « Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2018 ». Report n° 58. WMO, UN Environment, NOAA, NASA, European Commission,

L'ACCROISSEMENT DE LA CHARGE ATMOSPHÉRIQUE EN AÉROSOLS

■ QU'EST-CE QUE C'EST ?

Des constituants atmosphériques d'une grande variété

Les aérosols sont des particules de matière qui se trouvent en suspension dans l'atmosphère. Cette suspension des aérosols est rendue possible par leur taille et leur masse extrêmement faibles : la plupart des particules en suspension mesurent en général moins de 100 micromètres (μm) et peuvent être beaucoup plus petites. Par exemple, la toxicologie s'intéresse particulièrement aux particules de moins de 10 micromètres (PM10) car elles pénètrent les voies respiratoires : ces aérosols entrent dans la catégorie des particules fines.

De tailles diverses, ces particules en suspension dans l'air ont également des compositions chimiques très variées : il peut s'agir par exemple de soufre, de carbone organique, de carbone suie, de poussière minérale ou encore de particules azotées. Elles s'associent fréquemment et forment alors des mélanges de substances chimiques (on parle parfois de particules hybrides). Leurs origines sont multiples et peuvent être naturelles (poussières d'origine désertique, cendres volcaniques, pollens...) ou liées à l'activité humaine (Aoun, 2014 ; Voiland, 2010).

Ces particules ont des impacts directs ou indirects sur le climat ainsi que sur la vie à la surface de la Terre.

Un impact sur le climat qui prend plusieurs formes : des effets directs...

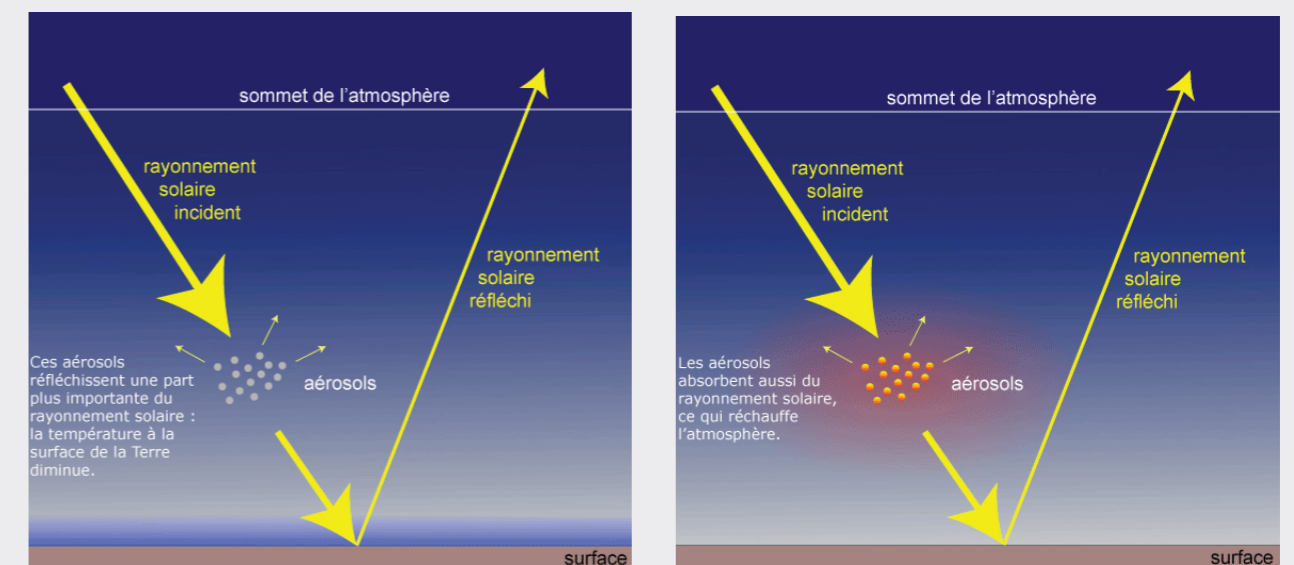
L'impact des aérosols sur le climat est potentiellement très important, en particulier lors d'événements entraînant un relargage massif de particules dans la stratosphère, comme lors d'éruptions volcaniques majeures.

Les aérosols ont tout d'abord un effet direct sur le climat : ils diffusent et absorbent le rayonnement solaire (cf. Figure 1). Ces deux processus ont toutefois des effets opposés sur le climat :

- **La diffusion** consiste en une déviation du rayonnement solaire par les aérosols. Le rayonnement est alors réfléchi dans toutes les directions, notamment vers l'espace, ce qui entraîne dans ce cas un refroidissement du climat, en particulier dans les basses couches de l'atmosphère.
- **L'absorption** du rayonnement solaire, de son côté, consiste en une captation de la chaleur par les aérosols, qui participent ainsi à réchauffer l'atmosphère.

Si les mécanismes d'action des aérosols sont connus, il est toutefois difficile d'en estimer précisément le bilan sur le climat (GIEC, 2007). Car tous les aérosols diffusent et absorbent à la fois le rayonnement solaire, mais dans différentes proportions. Les aérosols qui se forment suite aux émissions de soufre naturelles ou anthropiques sont, par exemple, particulièrement diffusants. Lors d'éruptions volcaniques massives, l'effet refroidissant tend donc à l'emporter du fait de la présence importante de soufre dans les particules rejetées. En 1991, l'éruption du Pinatubo a ainsi entraîné dans la région des Philippines un refroidissement de $0,6^\circ\text{C}$ au sol, et ce durant plus de deux ans. Au contraire, le carbone suie est très absorbant et l'accroissement de ses émissions tend à réchauffer le climat (Voiland, 2010 ; Boucher, 2013).

Figure 1 : Diffusion et absorption du rayonnement solaire par les aérosols (Boucher, 2013)
(Source : site *Climat-en-questions.fr*, crédit : Marc Jamous/Olivier Boucher)



...et des effets indirects sur le climat

Les aérosols peuvent également agir indirectement sur le climat car ils interviennent dans la formation des nuages en créant des noyaux de condensation ou de glaciation qui conduisent à la formation de gouttelettes d'eau nuageuse et de cristaux de glace. Il faut noter au passage que les noyaux de condensation sont créés dans l'atmosphère indépendamment de la présence ou non des aérosols, si bien que la formation des nuages est avant tout contrôlée par des processus dynamiques. Mais la présence plus ou moins abondante d'aérosols peut venir modifier les propriétés microphysiques des nuages, comme le nombre et la taille des gouttelettes d'eau. S'il est assez bien documenté et compris, cet effet radiatif indirect est cependant difficile à quantifier précisément. Dans certaines régions du monde, comme en Asie du sud, ce mécanisme est suspecté d'entraîner un assèchement du régime des moussons.

Enfin, en plus des effets directs et indirects cités précédemment, les aérosols peuvent avoir des effets semi-directs sur le climat : par exemple, en se déposant à la surface du sol, les particules de carbone suie peuvent réduire la réflexion de la lumière du soleil, et ainsi participer à un réchauffement des basses couches de l'atmosphère. (Voiland, 2010)

■ QUEL EST LE PROBLÈME ?

Des phénomènes naturels marqués par des pics épisodiques...

Les principales sources naturelles d'aérosols atmosphériques sont les tempêtes désertiques (qui soulèvent des quantités importantes de sable, de poussières et de sels marins dans l'atmosphère), la production de composés organiques volatiles (COV) par la végétation, les incendies de forêt et les éruptions volcaniques. Dans les basses couches de l'atmosphère, la présence de particules en suspension peut donc naturellement varier en fonction des saisons (pour le cas des COV issus de la végétation par exemple), des phénomènes météorologiques (les tempêtes pour ce qui concerne les transports de poussière ou de sel marin) ou de manière plus aléatoire du fait d'événements particuliers comme des incendies de forêt. Dans la stratosphère, les variations naturelles sont davantage le fait des éruptions volcaniques : l'éruption du volcan Laki, en 1783, a par exemple généré une surmortalité de 2 % en Islande et un hiver exceptionnellement froid dans toute l'Europe (Guillaume, 2006). Plus récemment, les éruptions volcaniques d'El Chichón au Mexique en 1982 et du Pinatubo aux Philippines en 1991 ont également induit des refroidissements passagers du fait de la réflexion d'une partie du rayonnement solaire (Boucher, 2013).

...et un phénomène de fond lié aux activités humaines depuis l'ère industrielle

Au cours des XIX^e et XX^e siècles, la tendance de fond est à un accroissement des émissions de particules d'origine anthropique. On estime aujourd'hui que les aérosols présents dans l'atmosphère liés à l'activité humaine représentent environ 10 % du total des particules en suspension ; localement, ces aérosols peuvent toutefois être très majoritaires, en particulier dans certaines régions du monde peuplées et urbanisées. Si bien que la population humaine est en moyenne très exposée à ces particules d'origine anthropique, qui proviennent d'une grande variété de sources. La combustion des énergies fossiles (industries, trafic automobile, chauffage) et la combustion de la biomasse (brûlis, chauffage) sont des sources importantes de production de carbone suie, de carbone organique et d'autres particules néfastes pour la santé humaine. Le trafic automobile, les incinérateurs et les centrales électriques sont des sources notables de particules chargées en soufre, en azote ou encore en carbone suie. La déforestation, le surpâturage ou l'irrigation excessive peuvent également dégrader les sols et accroître l'érosion éolienne – et donc la charge en particules de l'atmosphère.

Si la tendance globale est à la hausse, les émissions d'origine humaine ont toutefois connu des évolutions très différentes au cours des dernières décennies selon les régions du monde : les émissions d'aérosols diminuent de manière régulière dans les pays du Nord, en particulier du fait de politiques et de réglementations qui s'avèrent de plus en plus strictes en matière de



Un impact majeur sur la santé humaine

Les aérosols situés dans les plus basses couches de l'atmosphère ont des effets sur la vie, et notamment sur la santé humaine. La prise de conscience des effets de la pollution atmosphérique sur la santé doit beaucoup au fameux « smog londonien » de l'hiver 1952-53. Différentes études épidémiologiques menées depuis ont mis en évidence des relations statistiques entre indicateurs d'exposition aux polluants atmosphériques et la survenue d'événements sanitaires anormalement élevés dans la population (nombre de décès, cas d'asthmes...). Les études toxicologiques ont permis d'expliquer ces relations statistiques en décrivant les mécanismes d'action propres aux polluants atmosphériques : du fait de leurs faibles dimensions, les particules fines et ultrafines pénètrent profondément dans l'appareil respiratoire et s'y déposent. La capacité d'épuration des alvéoles pulmonaires est moins efficace pour les particules de petite taille. Une inflammation se déclenche donc et persiste lors d'expositions chroniques. Cela peut conduire à la restructuration des tissus pulmonaires et à la sécrétion de mucosités qui rétrécissent les conduits respiratoires, provoquant alors un

essoufflement. La faible taille de ces particules permet aussi leur passage dans le sang à travers la paroi alvéolaire, favorisant les risques cardio-vasculaires.

Parmi l'ensemble des particules fines (PM10 et 2,5), les impacts sanitaires du carbone suie semblent être particulièrement délétères. L'analyse d'un panel d'études et de cohortes montre une association entre les variations de concentrations de carbone suie à court et long terme et ses effets immédiats sur la santé (hausse de la morbidité et de la mortalité cardio-vasculaire, nombre d'admissions plus important dans les services cardio-pulmonaires hospitaliers, etc.). Plutôt que d'estimer la masse de l'ensemble des particules par m³ d'air, le carbone suie pourrait être un meilleur indicateur des substances particulaires nocives pour la santé humaine, issues de la combustion et notamment du trafic routier (Airparif, 2014).

Une étude de Santé Publique France a ainsi estimé à 48 000 le nombre de décès par an liés à l'exposition aux particules fines (Pascal et al., 2016).

Quel lien avec les autres processus planétaires ?

La concentration de l'atmosphère en aérosols est en partie liée au **changement climatique**. Les études existantes divergent sur la capacité des aérosols à renforcer ou limiter le changement climatique. Jusqu'à présent, les aérosols auraient plutôt eu tendance à réduire le réchauffement dans les basses couches de l'atmosphère. Ces études montrent toutefois que ces effets n'induiraient pas une rétroaction climatique importante. Du fait de leur intervention dans la formation des nuages, les aérosols peuvent également venir modifier le **cycle de l'eau**. Par exemple, le régime de mousson semble être perturbé par la pollution importante aux aérosols que connaît l'Asie du sud.

Certaines particules en suspension sont azotées et impactent donc le **cycle de l'azote**, participant indirectement à l'**acidification des océans**.

qualité de l'air (Europe, Amérique du Nord) ; mais ces émissions ont en revanche considérablement augmenté dans certains pays en développement, du fait en particulier de l'essor de l'industrie mais aussi de la croissance démographique que ces régions ont pu connaître (Asie et, dans une moindre mesure, Afrique et Amérique latine).

La combinaison de phénomènes naturels et anthropiques mène à des concentrations particulièrement élevées d'aérosols dans certaines régions du globe (cf. Figure 2). Les images satellites montrent aujourd'hui régulièrement des nuages d'aérosols se formant sur le Bangladesh, l'Inde et le Pakistan, ou encore sur les mégalo-poles de l'est de la Chine, résultant dans les deux cas de phénomènes naturels (comme les tempêtes de sable) considérablement aggravés par les activités humaines (industries, trafic, etc.).

Des conséquences sanitaires et climatiques inquiétantes

Les particules fines d'origine anthropique ont un impact massif sur la santé humaine : selon les estimations, la pollution atmosphérique aux particules fines serait responsable de 4,5 à 8,8 millions de morts chaque année. En Europe, elle serait responsable d'une baisse d'espérance de vie d'environ deux ans (Lelieveld et al., 2019).

Comme nous l'avons vu plus haut, l'impact de l'accroissement des aérosols d'origine humaine sur le climat est en revanche plus délicat à établir. Il est assez probable que les émissions anthropiques d'aérosols aient jusqu'à présent légèrement modéré le réchauffement climatique (Boucher, 2013). En revanche, on constate aujourd'hui des effets préoccupants de la pollution atmosphérique sur le climat de certaines régions du monde, notamment en Asie où le régime des moussons semble impacté.

■ QUELLE EST LA VARIABLE DE CONTRÔLE RETENUE ?

La variable de contrôle proposée pour mesurer la teneur en aérosols en suspension dans l'atmosphère est la profondeur (ou épaisseur) optique d'aérosols (AOD).

L'AOD reflète le niveau d'absorption et de diffusion de la lumière visible et infrarouge par les aérosols. Dans un ciel très clair, l'épaisseur optique peut avoir des valeurs proches de 0,05, équivalent à une transmission d'environ 95 % de la lumière. Au contraire, une valeur de 1 correspond à une atmosphère très chargée en particules qui absorbe et diffuse une part importante de la lumière (Steffen et al., 2015).

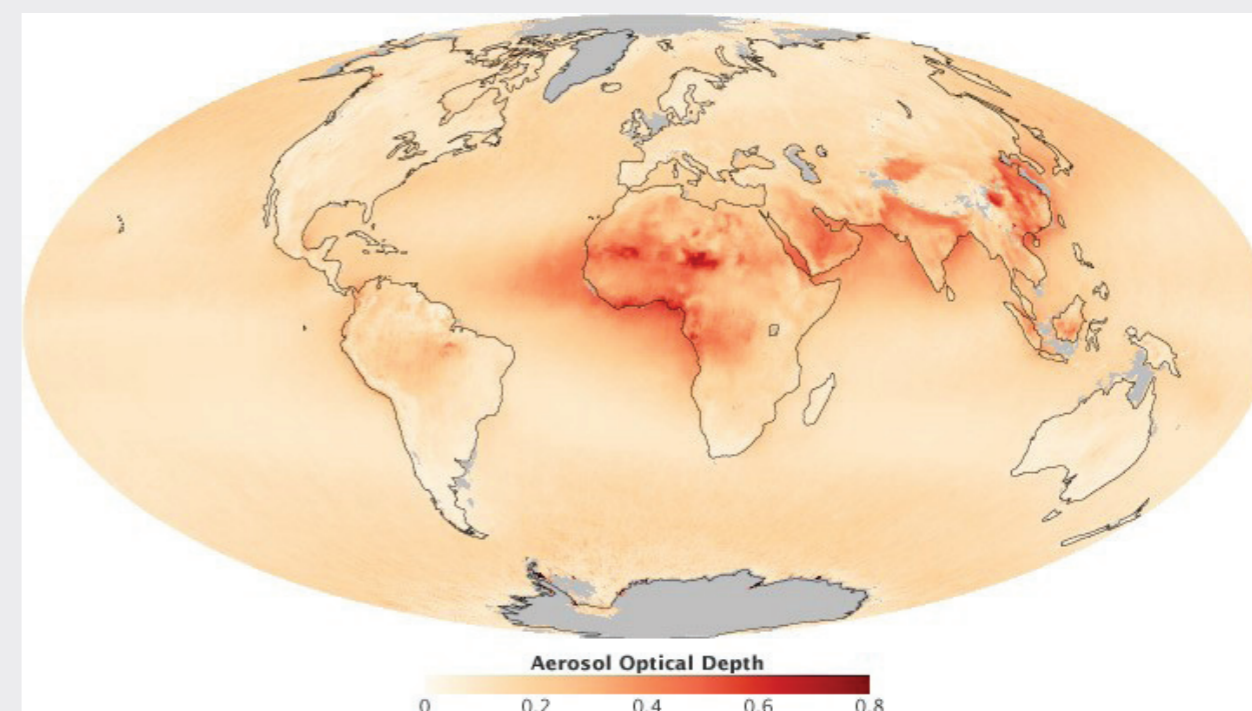
■ QUELLE EST LA FRONTIÈRE PLANÉTAIRE ?

testée sur la zone Asie du Sud : 0,25 AOD

Les effets climatiques directs des aérosols étant difficiles à déterminer, Johan Rockström et ses collègues n'avaient pas proposé de frontière globale pour cet enjeu dans leur article original sur les limites planétaires. En 2015, Will Steffen et ses collègues ont toutefois proposé de fixer pour les aérosols une frontière à l'échelle continentale, sur la base des effets indirects des aérosols, en s'intéressant en particulier à l'impact des aérosols sur les échanges d'eau entre l'océan et l'atmosphère. Will Steffen et ses collègues ont testé cette variable de contrôle sur le cas de la mousson sud-asiatique car la très forte charge atmosphérique en aérosols sur le sous-continent indien menace d'assécher le système de mousson. Le niveau naturel d'AOD pour l'Asie du sud est d'environ 0,15 et peut aller jusqu'à 0,4 lors d'irruptions volcaniques.

Les moyennes saisonnières d'AOD peuvent dépasser cette valeur de 0,4 du fait des émissions de carbone suie et de carbone organique liées au chauffage et à la cuisson par biomasse, aux véhicules diesel pour les transports et aux émissions atmosphériques d'oxydes d'azote et de soufre associées aux combustibles fossiles. Ces émissions anthropiques amènent une réduction de 10 à 15 % des radiations solaires à la surface de la terre. Les modèles climatiques montrent qu'une réduction significative de la mousson risque de se produire pour un AOD de 0,5, c'est-à-dire avec une augmentation de 0,35 au-delà du niveau naturel. En appliquant le principe de précaution du fait des hauts niveaux d'incertitude, Will Steffen et ses collègues

Figure 2 : Distribution moyenne des aérosols de mai 2000 à juin 2010
Le rouge indique une profondeur optique d'aérosols (AOD) élevée (tiré de Voiland, 2010)



Seuils sanitaires d'exposition aux particules

Concernant les impacts sanitaires, l'OMS préconise une concentration en PM_{2,5} inférieure à 10 µg/m³, alors que la réglementation européenne est de seulement 25 µg/m³. Ces seuils sont régulièrement dépassés dans de très nombreuses zones densément peuplées.

proposent pour cette région une limite d'AOD à 0,25 (et donc une augmentation liée à l'activité humaine de 0,1), avec une zone d'incertitude comprise de 0,25 à 0,5 (Steffen et al., 2015).

■ QUELLE EST LA VALEUR ACTUELLE ?

sur la zone Asie du Sud : 0,3 AOD

Dans la région d'Asie du Sud considérée, la moyenne annuelle de l'AOD est de 0,3 (Chin et al., 2014), ainsi positionnée au sein de la zone d'incertitude proposée par Will Steffen et ses collègues pour cette région (2015).

Rappelons que ces valeurs sont proposées à titre illustratif à l'échelle d'une région donnée, et qu'elles ne sont pas directement transposables à l'échelle mondiale, ce qui explique l'absence de repères à l'échelon planétaire dans l'état actuel des connaissances.



QUE PEUT-ON FAIRE ?

Dans les pays du Sud, renforcer les réglementations et les contrôles sur les sources d'émission

Au niveau mondial, la réduction des émissions de particules d'origine anthropique passe notamment par des réglementations et un contrôle plus strictes des sources d'émissions d'aérosols, conformément à ce que la plupart des pays de l'OCDE ont commencé à faire depuis plusieurs décennies. Dans les pays du Sud, cela devrait amener le secteur industriel à optimiser ses processus de production afin de limiter ses émissions de particules (meilleures technologies, normes plus ambitieuses). Les centrales électriques au charbon, aujourd'hui grosses émettrices de particules, devraient être progressivement substituées par d'autres formes de production électrique moins polluantes. Les normes sur les émissions des véhicules doivent également être renforcées en même temps que les alternatives au transport motorisé individuel favorisées dans les métropoles (transport public, modes doux). Le transport maritime, fort émetteur de particules, doit également chercher à améliorer ses performances et limiter ses impacts en particulier à proximité des côtes habitées. Les pratiques agricoles de brûlis et la déforestation doivent être prohibées ou limitées autant que possible. Dans les pays les plus pauvres, la mauvaise combustion des appareils de cuisson est une source majeure d'exposition des populations aux particules : faciliter l'accès à des modes de cuisson plus propres et moins énergivores permettrait de réduire les émissions atmosphériques d'aérosols nocives pour la santé humaine.

Dans les pays du Nord, des efforts à poursuivre également

Dans les pays plus riches, même si la situation tend à s'améliorer, l'enjeu est toutefois loin d'être résolu. La France fait ainsi l'objet d'un contentieux avec l'Union Européenne pour non-respect des valeurs réglementaires concernant les particules fines et le manque d'application des plans relatifs à l'amélioration de la qualité de l'air. En Auvergne-Rhône-Alpes, par exemple, le chauffage au bois est la première source d'émissions de PM10 (Atmo Auvergne Rhône-Alpes, non daté). Cette énergie renouvelable, neutre en carbone, doit donc continuer à se développer tout en réduisant considérablement ses émissions, ce qui passe par une isolation des logements et un renouvellement accéléré du parc d'appareils individuels peu performants, qui sont à l'origine de ce mauvais bilan du chauffage au bois en termes d'émissions de particules.

En milieu urbain, là où les populations sont généralement les plus exposées, des efforts doivent encore être menés pour réduire les émissions des autres sources majeures que sont les autres sources de chauffage, l'industrie et les transports routiers. Lors des pics de pollution, des mesures de restriction de l'usage des véhicules les plus polluants peuvent par exemple être mises en œuvre.

En quoi l'agglomération lyonnaise est-elle concernée ?

Des concentrations qui dépassent les préconisations

Comme la plupart des métropoles européennes, la métropole de Lyon est exposée à la pollution atmosphérique, notamment la pollution aux particules. Certaines années, comme en 2007, 50% de la population est exposée à des dépassements des valeurs limites (plus de 35 jours pollués) en PM10 sur l'ensemble du territoire (sur la zone centre Lyon-Villeurbanne, cette part a atteint 100% des habitants cette année-là). Même lorsque les normes sont respectées, les valeurs constatées sont toutefois le plus souvent au-delà des préconisations de l'OMS. La responsabilité des différents secteurs d'activité varie en fonction des sites et des influences qu'ils subissent (industrielles ou trafic automobile, par exemple). En moyenne, les particules fines du territoire proviennent équitablement de trois sources : l'industrie, les transports et le chauffage résidentiel (avec pour ce dernier secteur une part très importante liée au chauffage au bois, qui compte pour 25% du bilan total des émissions de particules). (Grand Lyon, 2016)

Le plan oxygène et ses principales mesures

En 2016, la Métropole a acté un plan d'action intitulé « plan oxygène », qui prévoit d'agir à différents niveaux :

- dans les transports, avec la mise en place d'une zone à faible émission dans le centre de la métropole (avec usage restrictif de véhicules polluants), le déclassement de l'autoroute A6/A7, le développement des transports en commun et des modes doux (pistes cyclables) ou encore l'aide à l'achat de vélos électriques ;
- dans l'habitat, avec le soutien aux rénovations thermiques, mais aussi la mise en place d'un fond air-bois qui permet aux particuliers de remplacer leurs vieux poeles à bois par des équipements plus performants ;
- dans le milieu économique, avec la réalisation d'audits énergétiques des entreprises, le soutien aux énergies renouvelables, l'instauration de mesures agro-environnementales ou encore le soutien à l'innovation (smart grids, nouveaux process industriels, etc.). (Grand Lyon, 2016)

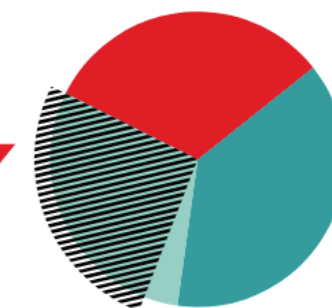
Des actions tournées vers le grand public sont également en cours, pour sensibiliser les habitants aux bonnes pratiques. Cela peut passer par exemple par le développement de micro-capteurs personnels de mesure de la qualité de l'air. Ces outils permettent à leurs utilisateurs de mieux comprendre les sources d'émissions de polluants et de les réduire lorsqu'ils en ont la possibilité (brûlage des déchets végétaux, chauffage au bois dans une cheminée ouverte, utilisation de la voiture, etc.). En outre, le micro-capteur a transformé certains expérimentateurs en ambassadeurs de la qualité de l'air (Atmo Auvergne Rhône-Alpes, 2017). Au niveau du Grand Lyon, le projet 3M'AIR – Mesures citoyennes mobiles et modélisation : qualité de l'air et îlots de chaleur à Lyon a pour objectif d'équiper des observateurs de capteurs peu ou moyennement onéreux et mobiles afin d'assurer une remontée efficace et en temps réel des données récoltées, pour un suivi de ces phénomènes au plus près des citoyens.

PARTICULES FINES PM₁₀



25%

Foyers ouverts



■ Transports ■ Résidentiel
 ▨ Chauffage individuel bois ■ Industrie

BIBLIOGRAPHIE

- Airparif. 2014. « Le carbone suie : enjeu présent et futur » AirParif Actu n°42, pp. 1-12. - https://www.airparif.asso.fr/_pdf/publications/NUMERO42.pdf
- Aoun Y., 2014. « Les aérosols atmosphériques, qu'est-ce que c'est ? » Article publié dans le cadre de l'université populaire de l'Environnement de Vence, 2014, 19 p. <hal-01555621> - <https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-01555621/document>
- Atmo Auvergne-Rhône-Alpes. 2017. « Mobicit'air : les résultats de l'expérimentation citoyenne » mis en ligne sur le site d'Atmo-Auvergne-Rhône-Alpes, octobre 2017. - <https://www.atmo-auvergnerrhonealpes.fr/article/chauffage-au-bois-et-qualite-de-lair>
- Atmo Auvergne Rhône-Alpes, non daté. « Chauffage au bois et qualité de l'air », mis en ligne sur le site d'Atmo-Auvergne-Rhône-Alpes, non daté. - <https://www.atmo-auvergnerrhonealpes.fr/article/chauffage-au-bois-et-qualite-de-lair>
- Boucher Olivier. 2013. « Comment les aérosols atmosphériques modifient-ils le climat ? » mis en ligne sur le site Le climat en question de l'Institut Pierre Simon Laplace, le 8 août 2013. - <http://www.climat-en-questions.fr/reponse/mecanismes-devolution/aerosols-climat-par-olivier-boucher>
- Chin M., Diehl T., Q. Tan, J. M. Prospero, R. A. Kahn, L. A. Remer, H. Yu, A. M. Sayer, H. Bian, I. V. Geogdzhayev, B. N. Holben, S. G. Howell, B. J. Huebert, N. C. Hsu, D. Kim, T. L. Kucsera, R. C. Levy, M. I. Mishchenko, X. Pan, P. K. Quinn, G. L. Schuster, D. G. Streets, S. A. Strode, O. Torres, X.-P. Zhao. 2014. « Multi-decadal aerosol variations from 1980 to 2009: A perspective from observations and a global model ». Atmos. Chem. Phys. 14, 3657–3690 10.5194/acp-14-3657-2014 doi:10.5194/acp-14-3657-2014
- GIEC (ed), 2007. « Changements climatiques 2007 : Les éléments scientifiques. Contribution du Groupe de travail I au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat », Solomon, S. ; Qin, D. ; Manning, M. ; Chen, Z. ; Marquis, M. ; Averyt, K.B. ; Tignor, M. ; Miller, H.L. edn, Cambridge University Press, Cambridge, UK et New York, NY, USA.
- Grand Lyon, 2016. « Plan oxygène ». Dossier de presse. Grand Lyon, Air Rhône-Alpes. - https://www.grandlyon.com/fileadmin/user_upload/media/pdf/espace-presse/dp/2016/20160621_dp_plan-oxygene.pdf
- Guillaume B., 2006. « Les aérosols : émissions, formation d'aérosols organiques secondaires, transport longue distance – Zoom sur les aérosols carbonés en Europe ». Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse III. <tel-00145318> - <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00145318>
- Lelieveld et al., 2019. « Cardiovascular disease burden from ambient air pollution in Europe reassessed using novel hazard ratio functions » European Heart Journal, ehz135. - <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehz135>
- Pascal et al., 2016. « Impacts de l'exposition chronique aux particules fines sur la mortalité en France continentale et analyse des gains en santé de plusieurs scénarios de réduction de la pollution atmosphérique ». Rapport publié et mis en ligne sur le site de Santé Publique France, le 21 juin 2016. - <http://invs.santepubliquefrance.fr/Publications-et-outils/Rapports-et-syntheses/Environnement-et-sante/2016/Impacts-de-l-exposition-chronique-aux-particules-fines-sur-la-mortalite-en-France-continentale-et-analyse-des-gains-en-sante-de-plusieurs-scenarios-de-reduction-de-la-pollution-atmospherique>
- Voiland A., 2010. « Aerosols: Tiny Particles, Big Impact », mis en ligne sur le site Earth Observatory de la Nasa, le 2 novembre 2010. - <https://earthobservatory.nasa.gov/features/Aerosols>



LES MENAÇES SUR L'INTÉGRITÉ DE LA BIOSPHÈRE

■ QU'EST-CE QUE C'EST ?

La biosphère est l'ensemble du vivant présent sur Terre

La biosphère est le terme généralement utilisé pour désigner l'ensemble des organismes vivants sur Terre : animaux, végétaux, champignons ou encore bactéries. Plus précisément, la biosphère constitue la partie biotique (vivante) de l'écosystème terrestre. La biosphère intervient dans chacun des cycles biogéochimiques, interagissant continuellement avec les trois sphères abiotiques (non vivantes) que sont l'atmosphère, l'hydrosphère et la lithosphère. Ces sphères « inertes » n'auraient donc pas le même fonctionnement ni les mêmes caractéristiques physico-chimiques sans la présence de la biosphère. Cette dernière constitue de ce fait un facteur de régulation incontournable des équilibres planétaires (Rockström et al., 2009).

La biodiversité est un élément fondamental de la résilience du système Terre

L'intégrité de la biosphère – c'est à dire sa capacité à conserver sa fonctionnalité – est en bonne partie déterminée par la diversité des éléments qui la composent : autrement dit, sa biodiversité. À l'échelle de la biosphère, la biodiversité forme une sorte de réseau biologique en constante évolution et interaction, dans lequel s'enchevêtrent trois niveaux de diversité : la diversité des gènes, celle des espèces et celle des écosystèmes (Wilson, 2007).

Pour comprendre l'importance de la biodiversité, on peut comparer celle-ci à une étoffe de patchwork : les gènes sont comme les fibres textiles qui, entrelacées, composent chaque fil, c'est à dire chaque espèce. Un assemblage d'espèces qui interagissent dans un même milieu constituent un écosystème, un peu comme un morceau de tissu résulte d'un assemblage de fils tissés entre eux. La biosphère, enfin, est l'assemblage de tous les écosystèmes imbriqués à l'échelle mondiale : c'est à dire le patchwork des écosystèmes terrestres. La diversité biologique est importante à chacune de ces échelles, notamment parce qu'elle assure au vivant des capacités d'adaptation (face aux évolutions du milieu) et de résilience, c'est à dire sa capacité à retrouver ses fonctions essentielles suite à une crise ou un choc. Plus la biodiversité du vivant est importante et plus la toile du vivant est à la fois souple (adaptable) et solide (résiliente). L'intégrité de la biosphère est donc intimement liée à sa biodiversité.

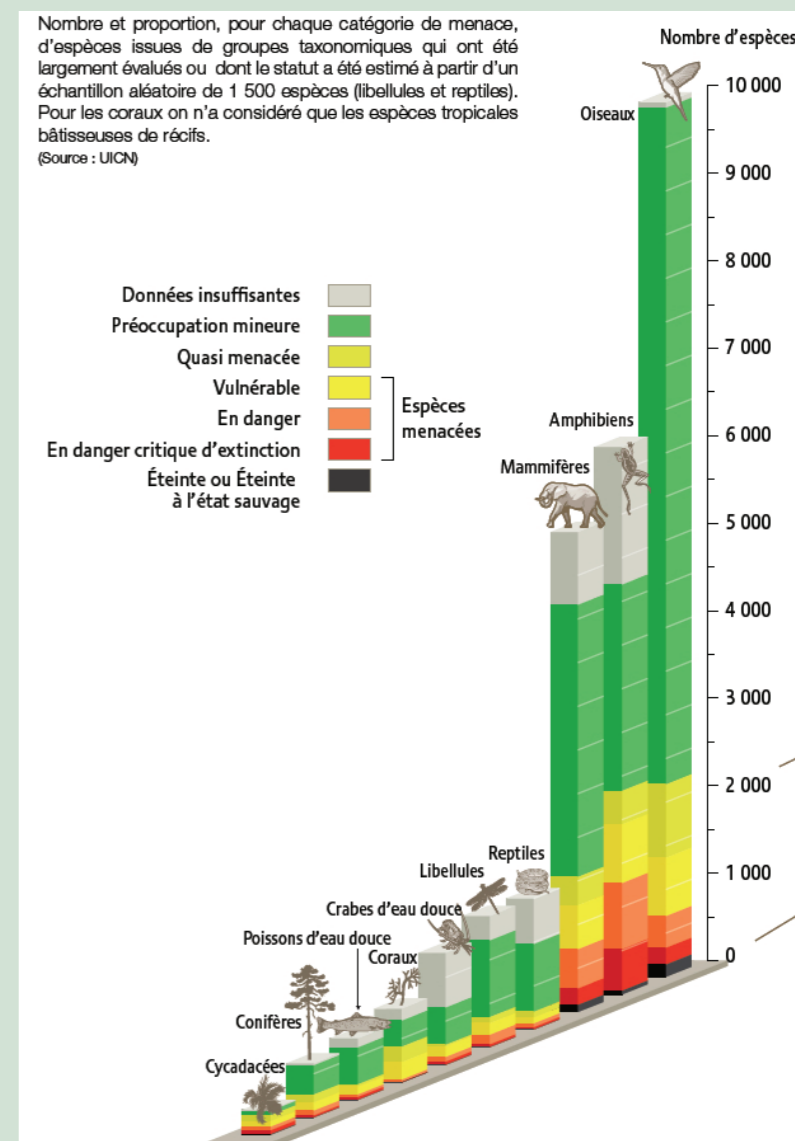
La biodiversité, un état d'équilibre dynamique entre spéciation et extinction

La vie sur Terre a connu cinq grandes crises d'extinction par le passé, dont la dernière et la plus connue est celle du Crétacé, qui a vu la disparition des dinosaures (il y a de cela un peu plus de 65 millions d'années). Chaque crise d'extinction massive est suivie par une période de plusieurs millions d'années durant laquelle on assiste à une intense diversification biologique – et notamment un accroissement très marqué du nombre de nouvelles espèces. Un nouvel équilibre dynamique se dessine alors, caractérisé par des évolutions plus lentes, durant lesquelles les espèces évoluent et s'adaptent à leur milieu, en fonction notamment de phénomènes géologiques et surtout climatiques, qui génèrent des processus de spéciation (création de nouvelles espèces) et d'extinction (disparition d'espèces). En dehors des crises d'extinction massive, l'évolution de la biodiversité spécifique est donc continue et elle résulte du bilan entre spéciations et extinctions. L'analyse sur le très long terme fait apparaître un rythme de spéciation supérieur à celui des extinctions, ce qui a mené à une extrême diversification du vivant (MEA Board, 2005).

Évolution des espèces animales et végétales

Le taux d'extinction des espèces constaté au cours du siècle passé peut s'avérer bien inférieur à celui du siècle à venir. C'est ce que laissent malheureusement présager d'autres indicateurs, relatifs à l'évolution des populations animales et végétales. Les populations de vertébrés ont par exemple été réduites de 60 % depuis 1970 au niveau mondial : cela signifie que la moitié de la faune sauvage a disparu (WWF, 2018) ! Le recensement le plus connu en la matière est celui de la Liste rouge de l'UICN. Cet organisme international se fonde

sur différents facteurs biologiques (population totale, taux de déclin, zone d'occurrence, zone d'occupation, degré de peuplement, fragmentation de la répartition) pour classer près de 97.000 espèces animales et végétales en fonction de leur risque d'extinction. Parmi elles, 26.500 (soit 27%) sont considérées comme menacées d'extinction. C'est le cas de 40% des amphibiens, 33% des coraux, 31% des requins et des raies, 27% des crustacés, 25% des mammifères ou encore 34% des conifères. (UICN, 2018)



■ QUEL EST LE PROBLÈME ?

Une érosion très importante de la biodiversité : vers une sixième extinction de masse

Aujourd'hui, près de 2 millions d'espèces ont été répertoriées, mais beaucoup d'espèces ne sont pas encore connues et les estimations scientifiques varient de 3 à 100 millions. Le consensus est aujourd'hui fixé autour de 8,7 millions d'espèces, chiffre qui n'inclue pas les bactéries, trop difficiles à compter (Lee et Oliver, 2016). L'étude des fossiles marins permet d'estimer que, hors crise d'extinction, la durée de vie moyenne d'une espèce varie de 1 à 10 millions d'années : ce qui revient à dire que le taux d'extinction normal des espèces marines est de 0,1 à 1 extinction par an pour un million d'espèces. Pour les mammifères, les chiffres sont du même ordre de grandeur. Les extinctions récentes ont été le mieux documentées pour les mammifères, les oiseaux et les amphibiens, soit environ 21 000 espèces au total. Or, au cours du siècle passé, environ 100 de ces espèces ont disparu, soit un taux d'extinction de 48 espèces par an pour un million d'espèces. Ce taux est donc de 48 à 480 fois plus important que le taux « normal » d'extinction. Et ce chiffre est probablement sous-estimé car, si on inclut les espèces que l'on soupçonne d'avoir disparu au cours du siècle, le taux d'extinction est doublé. De nombreuses autres incertitudes persistent : par exemple, on ne sait pas si l'extinction des mammifères, des oiseaux et des amphibiens est représentative ou pas du reste des espèces, beaucoup moins bien connues. Le Millenium Ecosystem Assessment estime prudemment que le taux d'extinction des espèces au cours du siècle passé est au moins 100 fois supérieur à leur taux d'extinction normal (MEA, 2005).

Ce constat a mené certains scientifiques à considérer que la période dans laquelle nous sommes entrés depuis l'ère industrielle peut s'apparenter à une sixième extinction de masse (Barnosky et al., 2011).

Des causes multiples et bien identifiées

Le groupe de scientifiques du Millenium Ecosystem Assessment identifiait en 2005 cinq causes principales de l'érosion de la biodiversité :

- La destruction ou la dégradation des écosystèmes et des habitats (déforestation, changement d'affectation des sols, urbanisation, fragmentation des habitats, etc.).
- Le changement climatique, qui perturbe le fonctionnement des écosystèmes ainsi que les principaux cycles biogéochimiques.
- La surexploitation de la biodiversité, c'est-à-dire le prélèvement d'espèces au-delà de leurs capacités de régénération (surpêche, surchasse, etc.).
- La prolifération d'espèces invasives (algues ou espèces cultivées envahissantes, espèces végétales ou animales importées ou introduites accidentellement).
- La pollution de l'air, de l'eau ou encore des sols (pollutions chimiques, organiques, etc.).

Une répartition géographique inégale de la biodiversité

Enfin, il faut noter que la diversité spécifique n'est pas équitablement répartie dans le monde, comme l'ont par exemple montré Norman Myers et ses collègues à la fin des années 1990 en inventant la notion de biodiversity hotspot (points chauds de biodiversité) (Myers et coll., 2000). Une quarantaine de ces « points chauds » concentrent plus de 50 % des espèces végétales et 42 % des espèces de vertébrés terrestres. (cf. Figure 1)

Malheureusement, ces régions sont également davantage sujettes à une dégradation d'origine humaine : ainsi, les indices d'abondance montrent que la situation des populations de nombreuses espèces peut s'améliorer dans certaines zones tempérées alors que la situation est beaucoup plus préoccupante dans de nombreux écosystèmes situés en zone tropicale ou intertropicale (WWF, 2018).

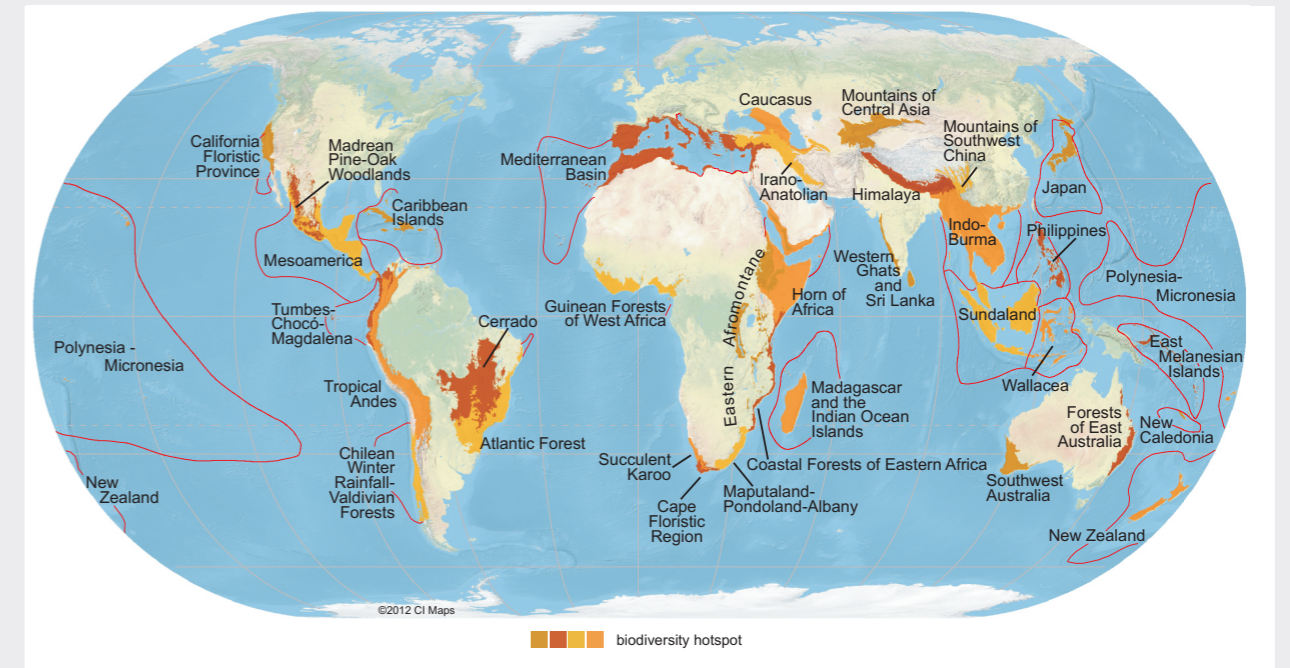


Figure 1 : Les points chauds de biodiversité dans le Monde
(Source : conservation.org)

Une érosion qui peut avoir des conséquences en chaîne

Les risques associés à la perte de biodiversité vont au-delà de la seule disparition d'espèces isolées. En effet, les espèces sont en interaction au travers des relations de consommation, de prédation, de parasitisme, de mutualisme (association bénéfique aux deux) ou de commensalisme (association bénéfique pour l'une et sans effet pour l'autre). Selon l'importance qu'occupe une espèce dans son écosystème, sa diminution ou sa disparition peuvent avoir des effets marginaux sur ce dernier ou, au contraire, entraîner son effondrement. Les pertes de biodiversité peuvent alors se traduire par des diminutions importantes de services écosystémiques, c'est à dire les services rendus à l'homme par la nature. Ces services sont de différents types, parfois identifiés dans la littérature anglo-saxonne comme les « 5S » :

- Source (ou ressource) : la production de ressources (pêche, foresterie, pollinisation, fertilité des sols, etc.).
- Sink (ou puits) : la décomposition des déchets, la séquestration du CO₂ dans les sols ou les océans, et plus généralement la régulation des cycles biogéochimiques.
- Site : la fourniture d'espaces physiques pour les activités humaines.
- Life Support (support de vie) : la préservation contre les risques de dégradation des conditions de vie (régulation du cycle de l'eau par les zones humides pour limiter les inondations, fixation du sol par le couvert végétal pour limiter l'érosion et les glissements de terrain, etc).
- Scenery (paysages) : qualités esthétiques d'un écosystème, dimension culturelle d'une espèce, etc. (Dauvergne, 2008 ; Grandcolas & Pellens, 2017).

La préservation de la diversité du vivant peut donc répondre à différentes éthiques, comme l'éthique environnementale, qui voit dans chaque espèce un patrimoine qu'il s'agit de conserver : c'est par exemple cette éthique qui fonde la défense de la préservation du panda, sur la base de sa dimension immatérielle, à la fois culturelle et symbolique (services de type « Scenery »). Mais elle peut aussi répondre à une éthique plus étroitement utilitariste, qui envisage les services matériels rendus par la nature à l'homme : c'est davantage cette éthique qui est en jeu lorsqu'on évoque l'effondrement des populations d'abeilles et que l'on évalue leur service de pollinisation à 2 milliards d'euros par an pour la France (services de type « Source ») (Chevassus-au-Louis, 2009).

■ QUELLE EST LA VARIABLE DE CONTRÔLE RETENUE ?

L'érosion des espèces n'est qu'une facette de la réalité de l'érosion du vivant. La diversité génétique est par exemple au moins aussi importante, mais il est aujourd'hui très difficile d'en estimer l'évolution. Faute de mieux, les spécialistes des limites planétaires ont donc choisi de se baser sur le taux d'extinction des espèces. Ils préviennent tout de même qu'il y a un danger à s'appuyer sur cette variable : la diversité génétique et la diversité fonctionnelle des écosystèmes (cf. encadré ci-contre) peuvent être plus sensibles aux pressions humaines que ne l'est la diversité des espèces (Steffen et al., 2015).

■ QUELLE EST LA FRONTIÈRE PLANÉTAIRE ?

10 extinctions/an/million d'espèces

Le taux d'extinction constaté au cours de l'holocène est d'environ une extinction/an/million d'espèces. Prenant en compte les fortes incertitudes, les scientifiques proposent finalement une frontière à 10 extinctions/an/million d'espèces, en n'oubliant pas de rappeler que cette frontière est sujette à caution : « *le danger est que le système Terre puisse tolérer un niveau d'extinction plus élevé pendant un temps, mais nous ne connaissons pas les niveaux ou les types de perte de biodiversité qui pourraient entraîner des changements non-linéaires ou irréversibles pour le système Terre.* » (Steffen et al., 2015). La question est d'autant plus sensible que les espèces n'ont pas toutes la même importance dans un écosystème donné, et la dis-



La diversité fonctionnelle

Une seconde variable est aujourd'hui proposée pour caractériser l'intégrité de la biosphère : il s'agit de la diversité fonctionnelle des écosystèmes, mesurée à travers un indicateur composite nommé Biodiversity Intactness Index. Ce dernier mesure l'évolution des populations de très nombreuses espèces à l'échelle d'un écosystème donné, exprimée en pourcentage par rapport à l'ère préindustrielle. L'indicateur permet ainsi de mesurer le degré de dégradation d'un écosystème généré par l'activité humaine. Cependant, cet indicateur n'est aujourd'hui

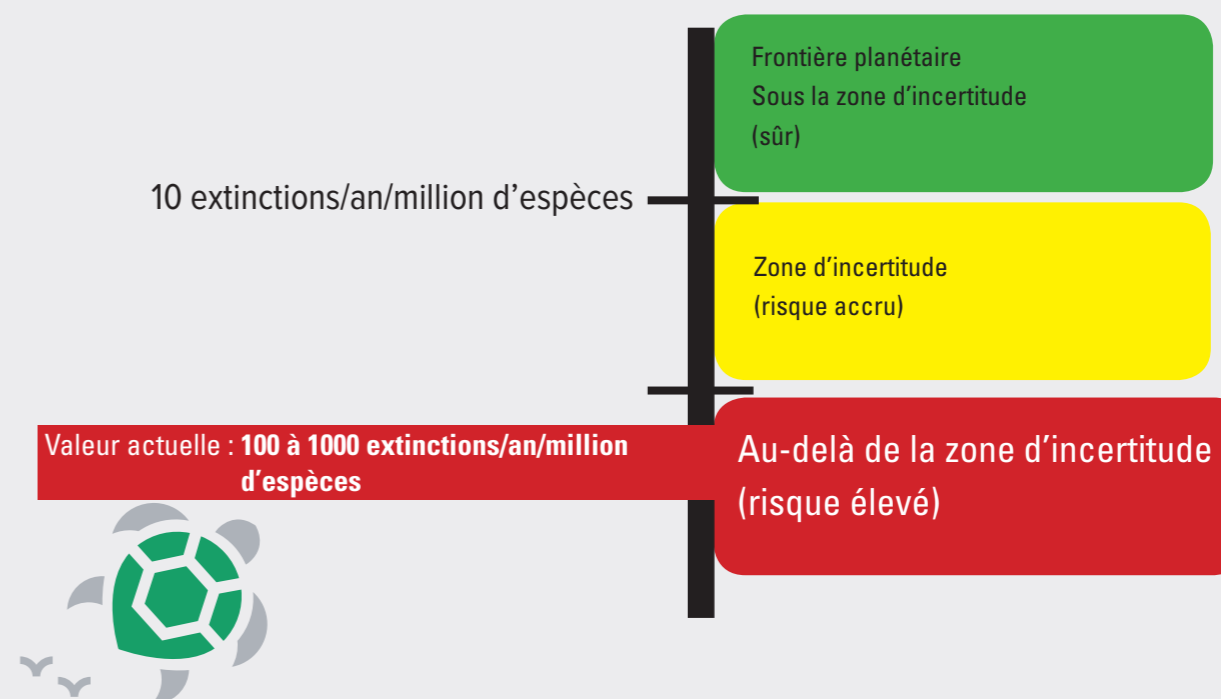
calculé que de manière marginale, raison pour laquelle la valeur ne peut pas encore être renseignée au niveau mondial.

En guise d'exemple, on peut rappeler qu'en Europe la population d'insectes s'est effondrée de 75 % en 30 ans (Hallmann et al., 2017). Au niveau mondial, le WWF se base sur le suivi de près de 17.000 espèces d'animaux (mammifères, oiseaux, poissons, reptiles et amphibiens) dont on estime que la population totale a chuté de 60 % depuis 1970 (WWF, 2018).

Quel lien avec les autres processus planétaires ?

La biosphère interagit avec les autres variables de régulation du système Terre, si bien que la biodiversité est menacée par certaines dérégulations des autres limites planétaires (et la perte de biodiversité peut également agir négativement sur celles-ci). Par exemple, une part importante de la biodiversité marine se concentre dans les récifs coralliens, qui sont à la fois très sensibles au **changement climatique** mais aussi à l'**acidification des océans**. Sur Terre, le premier facteur d'érosion de la biodiversité est la destruction des écosystèmes, qui se traduit bien souvent par un **changement d'affectation des sols** : des écosystèmes riches en biodiversité comme les forêts primaires d'Amazonie sont détruits pour être remplacés par d'autres beaucoup plus pauvres, telles des surfaces agricoles de type monoculture, ce qui se traduit souvent par une **perturbation des cycles biogéochimiques** (azote, phosphore). L'usage de substances nocives telles que les pesticides est également un facteur aggravant d'érosion de la biodiversité.

Ces facteurs tendent souvent à se renforcer. Le *Millenium Ecosystem Assessment* prévoit par ailleurs que l'intensification agricole et le changement climatique, qui sont déjà les principales causes d'érosion de la biodiversité aujourd'hui, devraient s'accélérer au cours des décennies à venir, laissant présager une multiplication par dix du taux d'extinction des espèces (MEA Board, 2005).



parition d'une espèce peut ne pas avoir d'effet majeur alors qu'au contraire la disparition (ou même la raréfaction) d'une autre aura des effets en cascade sur l'intégralité de l'écosystème.

■ QUELLE EST LA VALEUR ACTUELLE ?

100 à 1 000 extinctions/an/million d'espèces

Pour les espèces les plus documentées, la valeur d'érosion de la diversité constatée au cours du siècle passée est estimée entre 100 et 1 000 extinctions/an/million d'espèces.



QUE PEUT-ON FAIRE ?

La préservation de la biodiversité a fait l'objet d'une convention cadre lors du Sommet de la terre à Rio, en 1992. Les négociations des parties signataires ont abouti à un programme d'action pour la période 2010-2020 intitulé « objectifs d'Aichi ». (CDB-PNUE, 2010) Ces derniers visent notamment à s'attaquer aux causes sous-jacentes de la perte de biodiversité, par exemple en réduisant les pressions directes exercées sur la biodiversité et en encourageant son utilisation et sa gestion durables.

Stopper la fragmentation et la destruction des habitats naturels

La première cause d'érosion de la biodiversité étant la destruction des habitats, la priorité consiste donc à stopper celle-ci. La destruction « physique » des écosystèmes terrestres (leur disparition et leur fragmentation) est due en premier lieu à l'artificialisation des milieux, que ce soit par le biais de l'urbanisation (bâtiments, infrastructures de transport, équipements énergétiques, etc.) ou plus encore par le biais du développement agricole (substitution d'espaces naturels par des espaces cultivés). Une solution, certes insuffisante, consiste à sanctuariser une partie des milieux les plus riches en biodiversité, raison pour laquelle les Objectifs d'Aichi proposent que, d'ici à 2020, au moins 17 % des zones terrestres et 10 % des zones marines et côtières les plus riches en biodiversité et en services écosystémiques fassent l'objet de mesures de conservation appropriées (de type réserves naturelles par exemple). Il va de soi que les outils de préservation doivent s'accompagner de mesures pour contenir les dynamiques d'expansion urbaine et agricole, ce qui revient par exemple à s'interroger sur les types de culture à privilégier et les modes de consommation alimentaire à favoriser : par exemple en privilégiant les produits qui ont un impact plus faible sur la consommation d'espaces et qui entrent peu en concurrence avec les milieux naturels les plus riches en biodiversité.

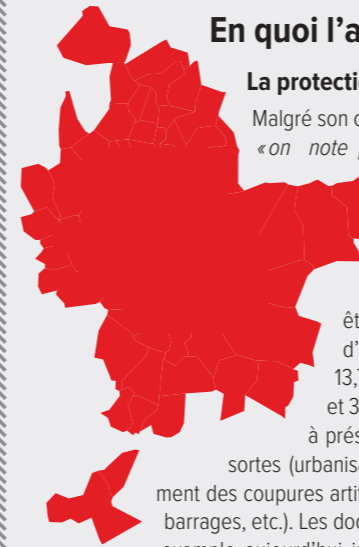
Supprimer les pollutions et les pressions anthropiques néfastes pour la biodiversité

Une autre cause importante d'érosion de la biodiversité est la perturbation des milieux naturels du fait de pollutions multiples qui portent atteinte à l'intégrité du vivant. Les pollutions chimiques, liées par exemple à l'usage de pesticides agricoles ou encore au relargage de polluants industriels ou urbains dans les milieux aquatiques ou dans l'atmosphère, sont une cause importante d'effondrement des populations de nombreux animaux. Les rejets excessifs d'éléments nutritifs dans les milieux naturels (en particulier azote et phosphore) sont une autre cause majeure de perturbation des cycles écologiques. L'introduction d'espèces exotiques invasives cause également une perturbation importante des écosystèmes. Les objectifs d'Aichi abordent chacun de ces points et proposent de limiter ces impacts néfastes. Même si les évaluations menées montrent qu'ils ne parviennent pour l'instant pas à enrayer la dynamique d'érosion du vivant à l'échelle mondiale, des exemples de bonnes pratiques montrent que la situation s'est améliorée dans de nombreuses zones où des mesures de protection et de bonne gestion des écosystèmes ont été appliquées (SCBD, 2014).

En quoi l'agglomération lyonnaise est-elle concernée ?

La protection de la biodiversité locale

Malgré son caractère urbain, le territoire de la métropole de Lyon présente une faune et une flore assez diversifiées : « on note par exemple la présence d'au moins 1219 espèces végétales indigènes dont 41 espèces protégées et une faune riche (...). Au total, environ 70 % de la richesse en espèces du département du Rhône est présente dans le territoire de la Métropole » (Écosphère, Métropole de Lyon, 2017). Les secteurs les plus remarquables font déjà l'objet de zonages d'inventaire ou de protection, avec par exemple une vingtaine d'espaces naturels sensibles et une trentaine de ZNIEFF*. Mais pour fonctionner et être pérennes, ces « réservoirs de biodiversité » ne doivent pas être fragmentés et isolés, mais au contraire être connectés avec le reste des écosystèmes par des « corridors écologiques ». Or la taille de la maille d'espaces naturels et agricoles continues sans rupture est faible sur la métropole, avec une moyenne de 13,7 km², ce qui correspond à la valeur basse du département du Rhône, dont les valeurs se situent entre 12 et 30 km² (Grand Lyon, 2019). C'est tout l'enjeu des politiques actuelles de trames vertes et bleues, qui visent à préserver ou rétablir ces corridors terrestres et aquatiques afin de limiter les pressions urbaines de toutes sortes (urbanisation, développement des infrastructures de transport, banalisation des milieux agricoles, développe-

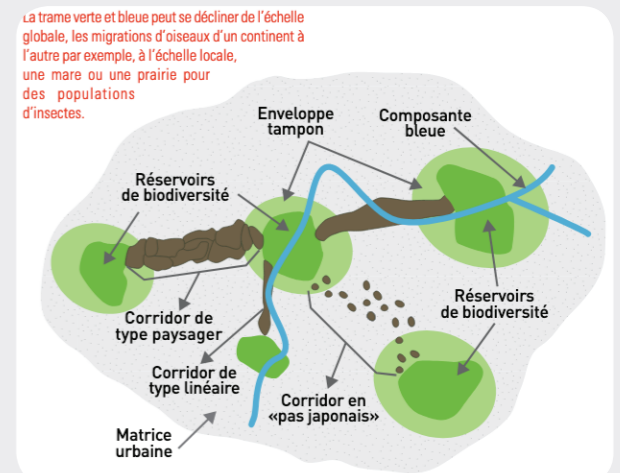


ment des coupures artificielles de types clôtures, seuils, barrages, etc.). Les documents d'urbanisme doivent par exemple aujourd'hui intégrer ces objectifs de préservation et de réhabilitation de la trame verte et bleue, afin de concilier au mieux la pression urbanistique et démographique croissante avec les objectifs de préservation de la biodiversité. La Métropole a élaboré une « boîte à outils » qui vise à accompagner les acteurs du territoire à favoriser la prise en compte de cet enjeu dans leurs actions (Métropole de Lyon, 2017).

Vers une réduction de « l'empreinte biodiversité globale » ?

Le territoire de la métropole participe par ailleurs à l'érosion de la biodiversité mondiale de manière indirecte, à travers notamment la consommation de biens dont la production agit sur les écosystèmes. Par exemple, la destruction des forêts tropicales et subtropicales est en grande partie liée à la production de denrées alimentaires à vocation exportatrices : maïs et soja destinés à l'alimentation animale, huile de palme, mais aussi café, thé, sucre de canne, etc. Réduire la consommation de ces biens pour les substituer par d'autres moins nocifs (et/ou produits plus localement) peut permettre de réduire la pression sur ces écosystèmes.

De la même manière, certaines espèces de poissons sont prélevées sans soucis du renouvellement des stocks (par exemple la sole, le cabillaud ou la morue de l'Atlantique, les principales espèces de thon de tous les océans, le merlu et le rouget de la Méditerranée, etc.). Il est important d'en limiter la consommation en diffusant une information claire aux professionnels de la distribution et aux consommateurs sur les zones de pêche et les espèces à éviter. Une application numérique de la FAO fournit par exemple des informations sur les espèces de poissons menacées**.



Réduire notre « empreinte biodiversité » ?

La destruction et la fragmentation des écosystèmes sont en grande partie opérées afin de répondre à des besoins de production agricole et forestière : par exemple, la destruction ou la surexploitation des forêts tropicales a pour but de permettre la production de bois tropicaux, d'huile de palme, de sucre, de café, de maïs ou encore de soja. Ces ressources sont en bonne partie exportées. Certains chercheurs estiment ainsi que le commerce international est responsable d'environ 30% des pressions exercées sur les espèces menacées.

L'étude révèle que certains pays riches et parfois peu dotés en biodiversité exercent une pression forte sur la biodiversité des pays pauvres par le biais de leurs importations. Cette approche semble prometteuse car elle permet de prendre conscience de l'impact que peuvent avoir certaines de nos consommations courantes (comme le café, le thé, ou encore la viande) sur les habitats des espèces les plus menacées à travers le monde (Lenzen et al., 2012).

* ZNIEFF : Zone naturelle d'intérêt écologique, faunistique et floristique

** <http://www.fao.org/news/story/fr/item/171707/icode/>

Gérer et prélever durablement les ressources biologiques

L'effondrement des populations de certaines espèces est majoritairement dû à une surexploitation des ressources. C'est par exemple le cas de certains poissons, dont les populations s'effondrent à cause de la surpêche et des effets en cascade qu'elle peut avoir sur les chaînes trophiques. Les Objectifs d'Aichi proposent que « *tous les stocks de poissons et d'invertébrés et plantes aquatiques [soient] gérés et récoltés d'une manière durable, légale et en appliquant des approches fondées sur les écosystèmes, de telle sorte que (...) l'impact de la pêche sur les stocks, les espèces et les écosystèmes reste dans des limites écologiques sûres* » (CDB-PNUE, 2010). La Norvège est par exemple parvenue à reconstituer les stocks de cabillaud de la mer de Barents en mettant en place une surveillance accrue des stocks et une réglementation stricte de l'activité de pêche (Court, 2012).



BIBLIOGRAPHIE

- Barnosky et al., 2011. « Has the Earth's sixth mass extinction already arrived ? », *Nature*, vol.471, n°7336, 2011, p.51-57.
- CDB-PNUE, 2010. « Plan stratégique pour la diversité biologique 2011-2020 et les objectifs d'Aichi », CDB., PNUE, Montréal. - <https://www.cbd.int/doc/strategic-plan/2011-2020/Aichi-Targets-FR.pdf>
- Chevassus-au-Louis, B. 2009. « Approche économique de la biodiversité et des services liés aux écosystèmes ». Contribution à la décision publique. Centre d'Analyse Stratégique, Paris.
- Court M. 2012. « La Norvège a reconstitué ses stocks de cabillaud. » *Le Figaro*, le 16/02/2012. - <http://www.lefigaro.fr/environnement/2012/02/16/01029-20120216ARTFIG00419-la-norvege-a-reconstitue-ses-stocks-de-cabillaud.php>
- Dauvergne S., 2008. « La mobilisation d'indicateurs pour l'évaluation de la soutenabilité de l'agriculture », Mémoire de Master 2, Université de Saint Quentin en Yvelines. - http://www.memoireonline.com/01/09/1900/m_La-mobilisation-dindicateurs-pour-levaluation-de-la-soutenabilite-de-lAgriculture9.html
- Ecosphère, Métropole de Lyon, 2017. « Diagnostic, stratégie de la trame verte et bleue de la Métropole de Lyon ». Grand Lyon. - <https://blogs.grandlyon.com/developpementdurable/files/2017/12/1-TVb-M%C3%A9tro-diagnostic-et-orientations-VA-sept-2017.pdf>
- Grancolas P., Pellens R., 2017. « Changement climatique et crise de la biodiversité : la dangereuse alliance » *The Conversation*, 24 octobre 2017. - <https://theconversation.com/changement-climatique-et-crise-de-la-biodiversite-la-dangereuse-alliance-83825>
- Grand Lyon, 2019. « L'observatoire métropolitain du développement durable. Où en est le territoire de la métropole de Lyon ? », Grand Lyon, Agence d'urbanisme urbalyon.
- Hallmann et al., 2017. « More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas », *Plos/One*, n°2(10), e0185809. - <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0185809>
- Lee M., Oliver P., « Biodiversité, combien de millions d'espèces ? » *The Conversation*, 20 juillet 2016. - <https://theconversation.com/biodiversite-combien-de-millions-despeces-61875>
- Lenzen M., Moran D., Kanemoto K., Foran B., Lobefaro L., Geschke A., 2012. « International trade drives biodiversity threats in developing nations », *Nature*, n°486, pp. 109–112
- MEA Board – Millenium Ecosystem Assessment Board, 2005. « Ecosystems and Human Well-Being: Biodiversity Synthesis ». World Resources Institute, Washington D.C.
- Métropole de Lyon, 2017. « Une boîte à outils au service de la trame verte et bleue de la métropole de Lyon », Grand Lyon. - https://blogs.grandlyon.com/developpementdurable/files/2017/12/2_TVb-M%C3%A9tro-bo%C3%A9te-%C3%A0-outils-VA-sept20171.pdf
- Myers N., Mittermeier R.A., Mittermeier C.G., da Fonseca G., Kent J., 2000. « Biodiversity hotspots for conservation priorities », *Nature*, Vol. 403, p.853-858
- SCDB - Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 2010. « Global Biodiversity Outlook ». Ed. by Secretariat of the Convention on Biological Diversity, Montréal.
- UICN, 2018. « More than 27.000 species are threatened with extinction », mis en ligne sur le site de la liste rouge de l'UICN. - <https://www.iucnredlist.org/>
- Wilson E.O., 2007. Interview in « La recherche », juillet-octobre 2007. - http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosbiodiv/index.php?pid=decouv_chapA&zoom_id=zoom_a1_1
- WWF – World Wildlife Fund for nature, 2018. « Rapport Planète Vivante 2018 ». ZSL, WWF, Gland. - https://www.wwf.fr/sites/default/files/doc-2018-10/20181030_Rapport_Planete_Vivante_2018_synthese.pdf

LE CHANGEMENT D'AFFECTATION DES SOLS

■ QU'EST-CE QUE C'EST ?

Le couvert végétal joue un rôle dans la régulation du climat et du cycle de l'eau...

La biosphère interagit avec les sphères « non vivantes » (lithosphère, atmosphère, hydrosphère) de nombreuses manières. Le cycle de l'eau et du carbone sont par exemple en partie déterminés par la biosphère. Or le type de couverture végétale et sa répartition sur la surface terrestre ont une influence considérable sur ces cycles biogéochimiques et donc sur la régulation des cycles de l'eau et celle du climat (cf. Figure 1). Le cas des forêts est symptomatique, puisqu'elles absorbent une part importante du rayonnement solaire et modèrent l'albédo (la réflexion du rayonnement solaire du sol vers l'atmosphère) ce qui a un effet sur le climat aussi bien au niveau local que global. Les forêts interagissent également avec le climat en régulant le taux de CO₂ dans l'atmosphère, par le biais de la photosynthèse : elles transforment le CO₂ atmosphérique en un stock de carbone dans la biomasse et produisent en retour de l'oxygène. Les forêts ont également un impact important sur le cycle de l'eau, puisque la canopée et les sols forestiers absorbent une partie des pluies et régulent l'infiltration de l'eau dans les nappes phréatiques et le ruissellement de surface. L'évapotranspiration des arbres et des plantes permet également une restitution importante et différée de l'eau de pluie vers l'atmosphère.

...et il impacte l'intégrité de la biosphère et la biodiversité

Le type de couvert végétal et sa répartition ont un impact direct sur la diversité du vivant. La fragmentation et la substitution d'écosystèmes naturels (notamment forestiers) par des espaces cultivés, pâturés ou urbanisés se traduit le plus souvent par une érosion de la biodiversité. Ce changement d'affectation des sols est ainsi considéré aujourd'hui comme l'une des principales causes de destruction des habitats et d'érosion du vivant (MEA Board, 2005).

■ QUEL EST LE PROBLÈME ?

Le couvert forestier décroît au profit des surfaces cultivées et urbanisées...

La superficie forestière occupe aujourd'hui environ 30 % des terres mondiales, et elle est en régression continue (cf. Figure 2). Entre 2000 et 2010, la perte nette de superficie forestière est d'environ 4 millions d'hectares par an, soit 450 hectares par heure (ou encore près de 8 hectares par minute). Ce bilan global résulte d'évolutions paradoxales puisque sur cette même période les forêts tempérées ont eu tendance à voir leurs superficies augmenter d'environ 3 millions d'hectares par an, généralement gagnées sur d'anciennes terres agricoles abandonnées, notamment en ex-URSS. Pendant ce temps, les forêts tropicales ont vu leurs surfaces décroître de 7 à 8 millions d'hectares par an, en particulier en Amérique latine, en Afrique et en Asie du Sud. Depuis le début des années 1990, certains pays du Sud ont ainsi perdu plus de la moitié de leur couvert forestier (FAO, 2016).

...provoquant des perturbations locales et globales

La déforestation n'a pas exactement les mêmes impacts selon le type de forêts : par exemple, en matière de climat, la destruction des forêts boréales a un fort effet d'accroissement de l'albédo tandis que la destruction de la végétation de type savane impacte davantage le climat

Figure 1 : Exemple d'effets de la couverture végétale sur le climat en milieu tropical (West et al., 2011)

Moins de radiation solaire est absorbée par la végétation dans les surfaces déboisées et une plus grande proportion de cette radiation est transformée en chaleur sensible, aboutissant à un climat plus chaud et sec en surface.

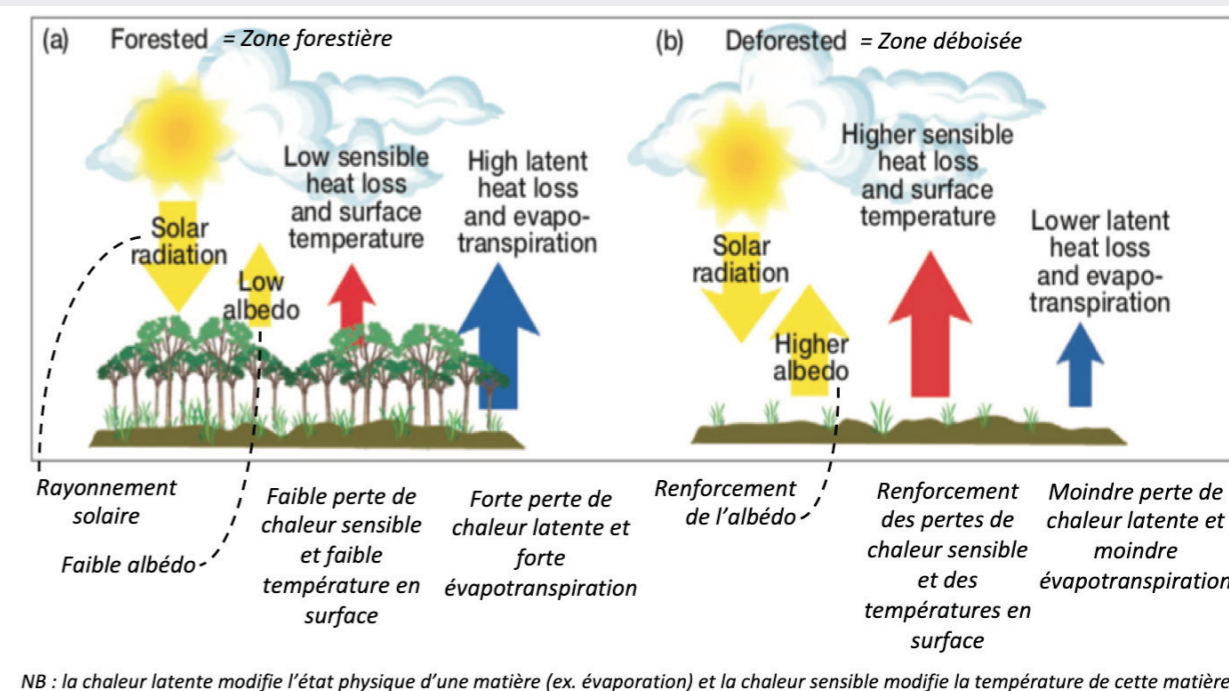
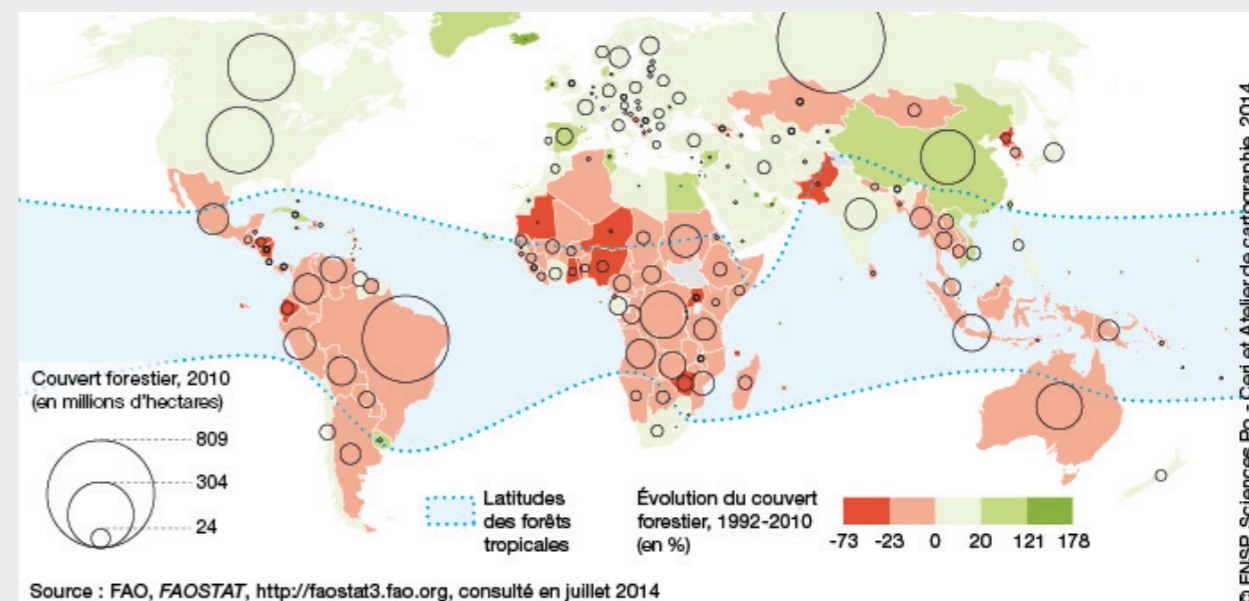


Figure 2 : Évolution du couvert forestier, 1992-2010 (Pirard, 2014, données FAO)



local et le régime des précipitations. Les études relatives à l'effet de la déforestation sur la biodiversité, le climat et le cycle de l'eau montrent malheureusement que la destruction des forêts tropicales, aujourd'hui la plus importante, a de nombreux effets négatifs. En particulier, elle entraîne un accroissement des températures de surface, une réduction de l'évapotranspiration et probablement une réduction de la pluviométrie (selon l'échelle à laquelle s'opère la déforestation). Les modélisations de déforestation à l'échelle d'une vaste région, comme par exemple la forêt amazonienne, révèlent des effets en cascade potentiellement catastrophiques à l'échelle locale (comme la désertification) mais aussi probablement à l'échelle mondiale (avec de probables modifications climatiques) (Delire et al., 2004 ; West et al., 2011).

Les forêts (et en particulier les forêts tropicales) abritent également de nombreux « hot spots » de biodiversité au niveau mondial, si bien que la destruction de ces milieux a des effets directs sur l'érosion de la diversité du vivant (MEA, 2005).

L'agriculture et l'urbanisation sont les principales causes de déforestation

Au niveau mondial, le principal moteur de la déforestation est l'agriculture (cf. Figure 3), et en particulier l'agriculture à vocation commerciale comme par exemple l'élevage extensif, la production de plantes fourragères (maïs, soja), les agrocarburants ou encore certaines productions exportatrices comme le cacao, le thé, le café ou l'huile de palme. L'agriculture locale et vivrière arrive en seconde position. L'urbanisation (extensions urbaines et infrastructures) est responsable de moins de 10 % de la déforestation, tandis que les activités extractives (mines ou gisements d'hydrocarbures) sont à l'origine de moins de 5 % des déforestations dans le monde (FAO, 2016).

■ QUELLE EST LA VARIABLE DE CONTRÔLE RETENUE ?

La variable de contrôle retenue pour mesurer le changement d'affectation des sols est la part (en pourcentage) de surface forestière comparée à la surface de couverture forestière originelle (avant 1700).

■ QUELLE EST LA FRONTIÈRE PLANÉTAIRE ?

75 % de la surface forestière originelle

La détermination d'une frontière globale est une fois de plus délicate à établir, et ce d'autant que la déforestation a des effets différents selon les types de biomes considérés. Par exemple, la destruction de la forêt tempérée a moins d'impacts globaux que celle des forêts boréales ou tropicales, pour leur participation au cycle de l'eau et à l'intégrité de la biosphère. De ce fait, des frontières ont été établies pour ces différents biomes : 50 % en valeur de risque accru (et 30 % en risque élevé) pour les forêts tempérées ; et 85 % en valeur de risque accru (60 % en risque élevé) pour les forêts tropicales et boréales. La moyenne pondérée au niveau mondial est donc de 75 % (54 % pour la frontière de risque élevé).

■ QUELLE EST LA VALEUR ACTUELLE ?

62 % de la surface forestière originelle

Actuellement, 62 % des surfaces forestières originelles sont encore des forêts.

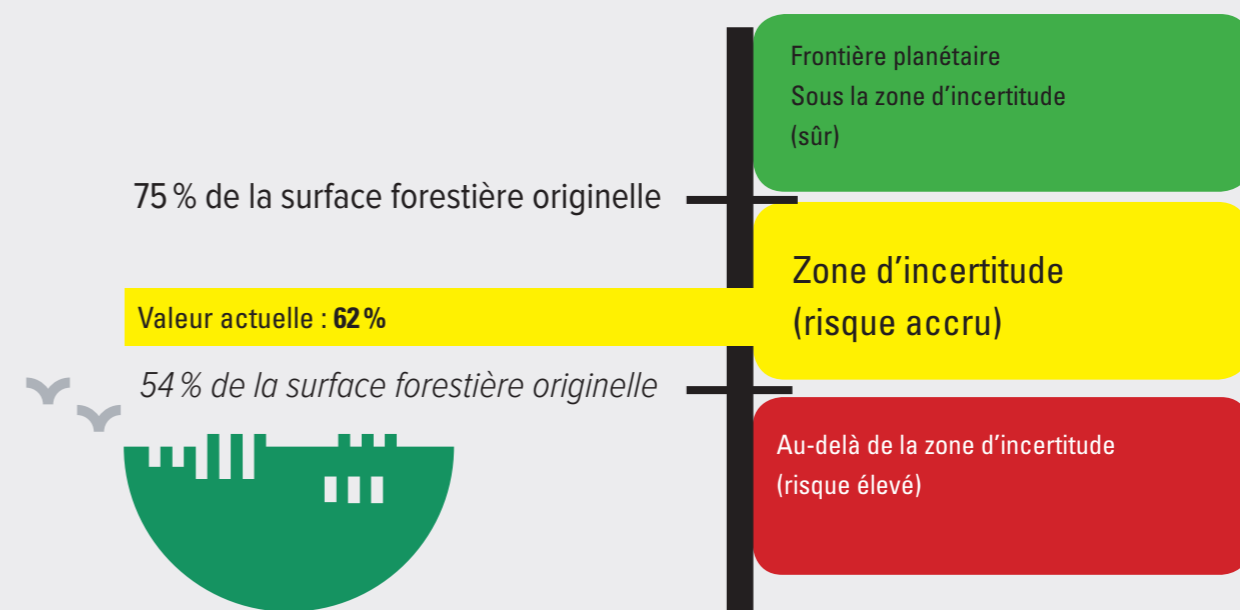
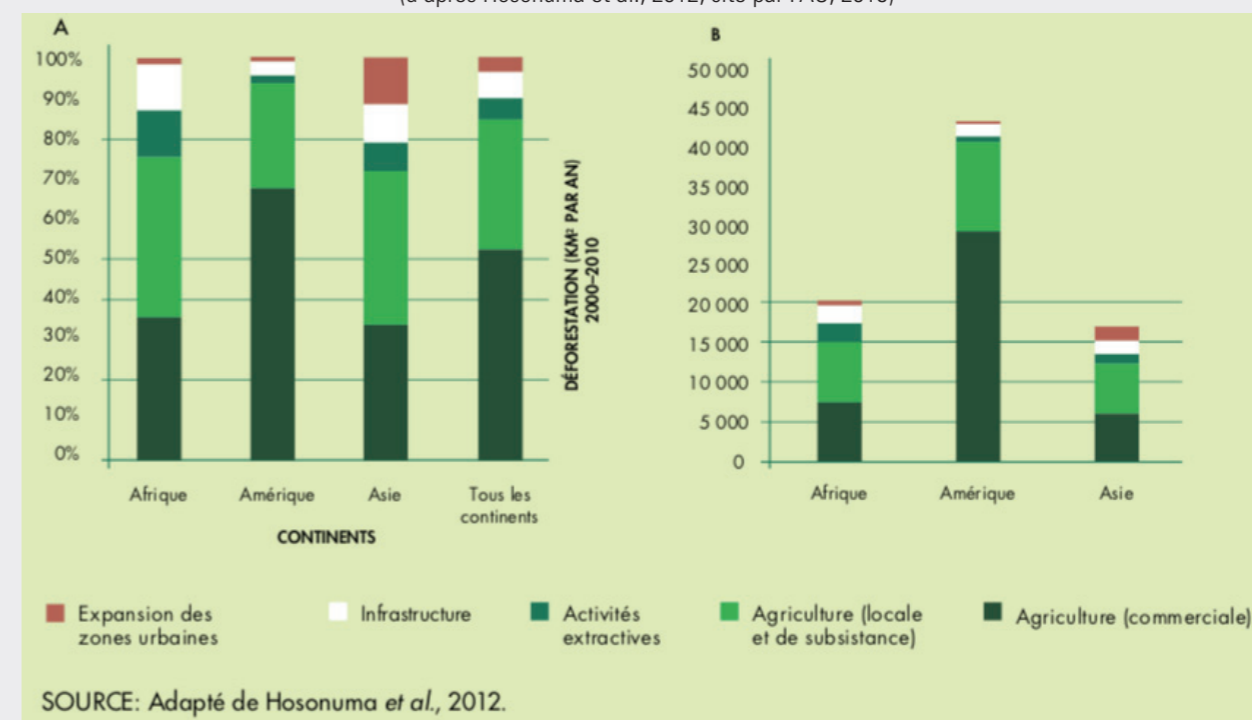


Caractériser les déséquilibres ne suffit pas...

La répartition en pourcentage entre types de surfaces (par exemple : forestière, agricole, urbanisée, etc.) ne suffit pas à caractériser finement les déséquilibres liés au changement d'affectation des sols. Comme le note par exemple Steve Bass, le fait d'accroître les surfaces agricoles a souvent des effets négatifs sur la qualité des sols et la capacité des milieux à réguler les cycles biogéochimiques : c'est notamment le cas lorsqu'il s'agit de grandes monocultures intensives utilisant des quantités importantes de pesticides et d'engrais minéraux. En revanche, la polyculture ou l'agroforesterie peuvent avoir des effets nettement moins négatifs, voire générer des effets gagnants-gagnants, à la fois pour les populations et leur

environnement naturel. Pour cette raison, Steve Bass préconise de porter davantage attention à la dégradation de la qualité et de la quantité des sols (Bass, 2009). De telles données semblent toutefois difficiles à traiter au niveau global. Mais ces critiques ont amené les auteurs de la littérature sur les limites planétaires à ne plus considérer l'extension des surfaces agricoles comme limite planétaire (ce qui était proposé dans l'article originel de 2009) pour privilégier la destruction des surfaces forestières, qui peut être considérée comme un facteur limitant eu égard aux nombreuses fonctions de régulation de la forêt au niveau mondial (Steffen et al., 2015).

Figure 3 : Estimation (A) de la répartition de l'ensemble des changements d'utilisation des terres entre les différentes causes directes de la déforestation et (B) du changement net de la superficie forestière (en milliers d'hectares) associé aux différentes causes directes de déforestation, par région, sur la période 2000-2010 (d'après Hosonuma et al., 2012, cité par FAO, 2016)





QUE PEUT-ON FAIRE ?

Contrairement à certaines problématiques comme le climat ou la biodiversité, il n'existe pas de convention internationale relative à l'occupation des sols. La Conférence de Rio en 1992 a tout de même proposé une déclaration de principes sur les forêts qui a mené à la création du Forum des Nations-Unies pour les Forêts. Ce dernier élabore un plan d'action pluriannuel visant à préserver les forêts à travers différentes préconisations non contraignantes. Will Steffen et ses collègues (2015) remarquent par ailleurs que l'atteinte de l'objectif sur l'intégrité de la biosphère permettrait sans doute de respecter celui sur l'affectation des sols, tant la préservation des forêts est un enjeu central en matière de biodiversité.

Préserver juridiquement les territoires forestiers

Une première mesure efficace consiste à développer des formes de protection juridique des écosystèmes forestiers dans les pays où ceux-ci sont les plus menacés, sous formes de réserves ou de parcs naturels, par exemple, ou encore par le biais de documents de planification de l'aménagement du territoire permettant de maîtriser la déforestation. La maîtrise du foncier est également un levier d'action qui peut s'avérer efficace dans certains pays. En l'absence d'accord international contraignant, ces mesures relèvent toutefois de la décision des pays (FAO, 2016).

Mieux valoriser la protection des forêts

La pression exercée sur les forêts provient souvent de leur faible valeur économique, en particulier dans des pays pauvres et/ou connaissant une forte croissance démographique. Une piste consiste à mieux valoriser les produits issus des forêts, en s'assurant également que celles-ci sont gérées durablement (avec par exemple le développement des filières et des labels garantissant la gestion soutenable des forêts). (FAO, 2016) Des mesures ciblées sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre liées à la déforestation, comme le dispositif des Nations-Unies REDD (*Reducing Emissions from Deforestation and forest Degradation*) proposent par exemple des transferts de fonds des pays riches vers les pays pauvres afin que ceux-ci mettent en place des mesures plus efficaces de protection et de valorisation des forêts.

Accroître la productivité des surfaces agricoles dans les pays à fort enjeu forestier

L'agriculture étant la première cause de destruction des surfaces forestières au niveau mondial, une manière de concilier accroissement de la production agricole et préservation des surfaces forestières consiste à augmenter la productivité des terres agricoles. Un tel processus doit toutefois se faire en évitant les dérives de l'agriculture industrielle et de la monoculture, qui impactent d'autres limites planétaires comme le déséquilibre des cycles de l'azote et du phosphore. La polyculture, l'agroforesterie et l'agrobiologie ont l'avantage d'offrir des rendements élevés dans les climats tropicaux et subtropicaux, où leur développement pourrait permettre de concilier préservation du couvert forestier et accroissement de la productivité agricole (Caplat, 2012).

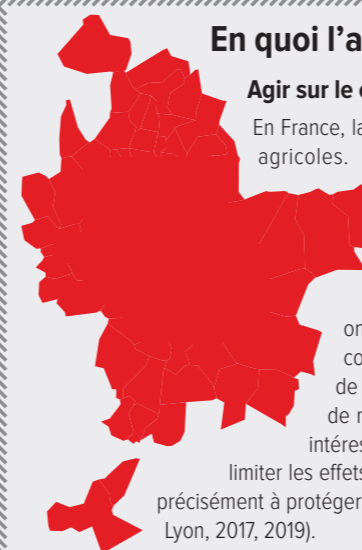
Infléchir la demande de produits destructeurs d'espaces forestiers

Dans de nombreux pays disposant de forêts tropicales, l'agriculture à vocation exportatrice est le principal moteur de la destruction du couvert forestier. L'élevage extensif et la production de plantes fourragères destinées à l'exportation jouent par exemple un rôle majeur dans la déforestation en Amérique latine, afin de répondre à la demande de consommation de viande

Quel lien avec les autres processus planétaires ?

Le changement d'affectation des sols, et en particulier la déforestation, interagit directement avec plusieurs autres limites planétaires. La destruction des forêts est une cause majeure de **recul de la biodiversité** dans le monde, et représente donc une menace sur l'intégrité de la biosphère. Il s'agit également d'une cause importante de relargage de CO₂ de la biosphère vers l'atmosphère, ce qui impacte bien entendu le **changement climatique**, mais aussi indirectement l'**acidification des océans**. La modification du cycle du carbone n'est pas la seule façon dont le changement d'affectation des sols impacte le climat, puisque la couverture végétale a un effet direct sur la manière dont le rayonnement solaire interagit avec l'atmosphère, puisque la déforestation accroît l'albédo et réduit l'évapotranspiration. L'usage de l'**eau douce** est également potentiellement impacté par la déforestation, du fait des capacités de régulation du cycle de l'eau dont les surfaces forestières sont dotées.

Plus indirectement, les cycles biogéochimiques de l'**azote** et du **phosphore** sont également impactés, notamment lorsque les surfaces forestières sont remplacées par des surfaces cultivées de manière intensive. À ce titre, il faut prendre garde que le souci de préservation des surfaces forestières ne se traduise par une intensification de l'usage d'engrais minéraux et de pesticides dans l'agriculture.



En quoi l'agglomération lyonnaise est-elle concernée ?

Agir sur le couvert végétal du territoire...

En France, la forêt et les autres espaces naturels ne couvrent que 40 % du territoire, contre 50 % pour les surfaces agricoles. La forêt est toutefois en légère progression, mais c'est l'artificialisation des sols qui voit sa proportion le plus progresser, avec chaque année plusieurs dizaines de milliers d'hectares supplémentaires. Cette progression se fait donc au détriment des surfaces agricoles, qui voient leurs superficies réduire (MTES, 2016). Comme tous les territoires urbains, la métropole de Lyon voit la majorité de son sol occupé par des surfaces aménagées ou urbanisées : 58,3 % des sols sont artificialisés en 2015, soit 5 % de plus qu'en 2000. Même si le rythme s'est ralenti depuis les années 1990, une centaine d'hectares ont été artificialisés chaque année entre 2000 et 2015, majoritairement au détriment des espaces agricoles. Les démarches visant à développer les trames vertes et bleues (cf. fiche « Les menaces sur l'intégrité de la biosphère ») permettent d'envisager un accroissement des surfaces végétalisées et arborées. Il en va de même des travaux de végétalisation de la ville, qui sont de plus en plus considérés comme des leviers intéressants de modification du climat local et d'adaptation face au changement climatique – notamment pour limiter les effets d'îlots de chaleur urbain. Le « Plan canopée » de la Métropole de Lyon comprend 25 actions qui visent précisément à protéger et développer la forêt urbaine afin d'accroître les surfaces ombragées et influencer le climat urbain (Grand Lyon, 2017, 2019).

...et tenter de limiter la pression sur la forêt mondiale ?

La métropole exerce également une pression indirecte sur les forêts mondiales par le biais de ses consommations, dont certaines sont à l'origine de la déforestation mondiale. C'est le cas du bois issu de forêts gérées de manière insoutenable, mais aussi (et surtout) des denrées alimentaires à vocation exportatrices comme les plantes fourragères destinées à l'alimentation animale, l'huile de palme, le café, le thé, le sucre de canne, etc. Comme pour la préservation de la biodiversité, le fait de réduire la consommation de ces biens pour les substituer par d'autres (produits plus localement ou plus durablement) peut participer à réduire la pression sur ces écosystèmes (cf. fiche « Les menaces de l'intégrité de la biosphère »).

et d'autres produits issus des animaux en Europe ou en Asie. En Afrique, en Asie du Sud-Est ou dans certains pays d'Amérique latine, ce sont davantage la production d'agro-carburants, d'huile de palme, de thé, de cacao ou de café qui motivent l'extension des terres cultivées au détriment de la forêt. Même si elle est encore peu évoquée, une piste consiste à infléchir la demande mondiale de ces produits, par exemple en informant les citoyens sur l'impact de leurs consommations et en leur proposant des alternatives.

BIBLIOGRAPHIE

- Bass S., 2009. « Planetary Boundaries: Keep off the grass », *Nature Reports Climate Change*, pp. 113-114
- Caplat J., 2012. « L'agriculture biologique pour nourrir l'humanité. Démonstration ». Actes Sud, Arles.
- Delire C., Foley J., 2004. « Evaluating the Influence of Different Vegetation Biomes on the Global Climate », *Climate Dynamics*, September 2004, n°23, pp. 279-302
- FAO – Food and Agriculture Organization, 2016. « Situation des forêts du monde 2016. Forêts et agriculture : défis et possibilités concernant l'utilisation des terres ». Ed. FAO, Rome.
- Foley J.A., Costa M.H., Delire C., Ramankutty N., Snyder P., 2003. « Green surprise? How terrestrial ecosystems could affect earth's climate » *Frontiers in Ecology and the Environment*, 1(1), pp. 38-44
- Grand Lyon, 2017. « Le plan canopée. Protéger et développer la forêt urbaine », Grand Lyon. - https://blogs.grandlyon.com/developpementdurable/wp-content/blogs.dir/11/files/dlm_uploads/2018/03/Plan-Canop%C3%A9e-M%C3%A9tropole-de-Lyon-2018.pdf
- Grand Lyon, 2019. « L'observatoire métropolitain du développement durable. Où en est le territoire de la métropole de Lyon ? », Grand Lyon, Agence d'urbanisme urbalyon.
- MEA Board – Millenium Ecosystem Assessment Board, 2005. « Ecosystems and Human Well-Being: Biodiversity Synthesis ». World Resources Institute, Washington D.C.
- MTES, 2016. « Les nouveaux indicateurs : Artificialisation des sols », publié sur le site du gouvernement français, en 2016. - <https://www.gouvernement.fr/indicateur-artificialisation-sols>
- Pirard R., 2014. « Répondre au défi de la déforestation tropicale », CERISCOPE Environnement, mis en ligne le 26 mars 2014. - <http://ceriscope.sciences-po.fr/environnement/content/part2/repondre-au-defi-de-la-deforestation-tropicale>
- West P.C., Barford C.C., Narisma G.T., Kuchank C.J., 2011. « An alternative approach for quantifying climate regulation by ecosystems » *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9(2), pp. 126-133



LES NOUVELLES POLLUTIONS CHIMIQUES



QU'ENTEND-ON PAR ENTITÉS NOUVELLES ?

Dans leur article original de 2009, Johan Rockström et ses collègues proposaient de définir une limite planétaire liée aux pollutions chimiques. En 2015, Will Steffen et ses collègues préfèrent utiliser le terme, plus large, d'entités nouvelles (novel entities).

Des éléments créés par l'Homme et introduits dans le milieu naturel

Les entités nouvelles peuvent être définies comme des substances de synthèse, ou de nouvelles formes de substances existantes, ou encore des formes modifiées de vie qui ont été produites par l'Homme et introduites dans l'environnement, tout en ayant des effets physiques ou biologiques potentiellement perturbants pour ce dernier (et pour la santé humaine).

Cette définition comprend les substances chimiques (comme le glyphosate ou les phtalates, par exemple) et les matériaux ou organismes de toutes sortes créés ou modifiés par l'Homme (nanoparticules, microplastiques, OGM...). Mais elle intègre également certains éléments naturels qui ont été mobilisés et concentrés par les activités humaines et dont le relargage dans les écosystèmes peut générer des déséquilibres pour ces derniers (c'est le cas des métaux lourds, par exemple, comme le mercure ou le plomb).

Ces entités nouvelles peuvent avoir des effets sur l'environnement parfois suspectés ou parfois avérés ; et ces effets peuvent être localisés ou globaux. Lorsqu'ils sont avérés et globaux, ces impacts peuvent menacer certaines limites environnementales planétaires. Par exemple, l'usage des CFC est à l'origine de l'érosion anthropique de la couche d'ozone stratosphérique (Steffen et al., 2015). Par certains aspects, on peut donc considérer les entités nouvelles comme une sorte de « réserve de menaces potentielles » pour les équilibres du système Terre.

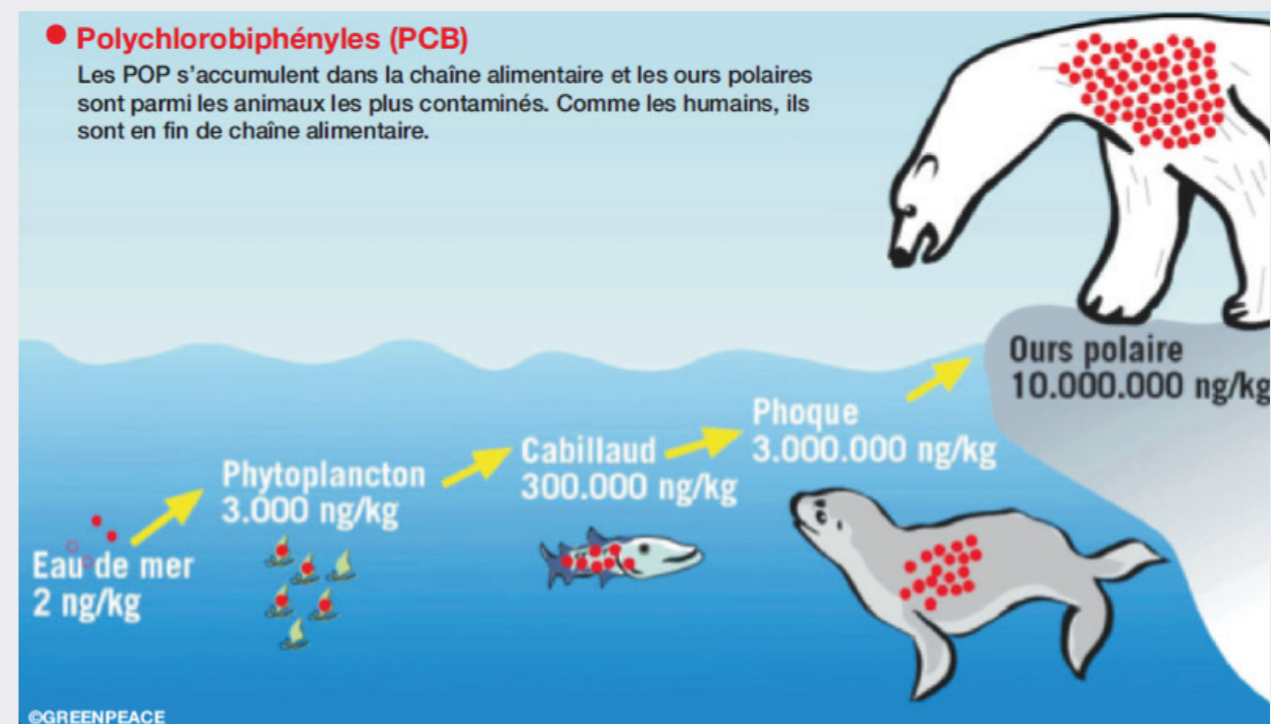
Le cas des substances chimiques

Pour donner une idée de l'ampleur de cette « réserve de menaces potentielles », on peut citer le cas des substances chimiques créées par l'Homme, dont la présence dans l'environnement s'est considérablement accrue au cours des décennies passées (cf. Figure 1). La production mondiale de substances chimiques atteint aujourd'hui plus de 500 millions de tonnes par an, soit 500 fois plus qu'en 1930. La moitié de ces tonnages est constituée de plastiques dérivés du pétrole et un tiers sont des engrais minéraux. Mais réfléchir en volume ou en poids ne suffit pas, puisque la nocivité d'une substance n'est pas forcément liée à sa quantité. Or la diversité des substances créées par les activités humaines est telle qu'il est aujourd'hui devenu tout bonnement impossible d'en anticiper les impacts sur la santé et la nature. Ainsi, parmi les plus de 150 000 substances déclarées dans le cadre de la directive européenne REACH, seules 3 000 (2%) font aujourd'hui l'objet d'une évaluation au moins partielle de leurs effets sur la santé et l'environnement (Cicoella, 2013).

Figure 1 : Le principe de bioamplification : le cas des PCB - © Greenpeace, 2008

Concentrations en PCB exprimées en nanogrammes (ng) par kg de matière vivante.

Notes : les PCB, parfois appelés pyralène, sont des POP interdits dans les années 1980 qui ont été utilisés auparavant comme ignifuges dans les transformateurs électriques, mais aussi dans d'autres applications.



■ QUEL EST LE PROBLÈME ?

Des impacts environnementaux aux formes multiples

Pour poursuivre sur le cas des substances chimiques de synthèse, il faut d'abord remarquer que leurs formes sont multiples : elles interviennent par exemple dans les procédés de production agricole (pesticides), dans les procédés de production industrielle (chimie, pharmacie, plasturgie, etc.), dans les produits qui sont ensuite mis sur le marché (alimentation, médicaments, produits d'hygiène, solvants, matériaux divers contenant des plastiques, etc.) ou encore lors du traitement en fin de vie de ces produits (incinération par exemple). Ils peuvent donc être rejetés dans l'environnement à chacune de ces phases du cycle de vie des produits et, selon leur forme (gazeuse, liquide, solide), ils vont alors venir polluer l'eau, l'air ou encore le sol – avant éventuellement d'être oxydés, transformés, dégradés, captés par les végétaux ou encore ingérés par les animaux, selon les cas.

Les polluants organiques persistants (POP) sont un exemple symptomatique de cette dynamique. Les sources de POP sont nombreuses : il peut s'agir de substances délibérément produites par l'homme, comme les pesticides ou encore les pyralènes (PCB) utilisés comme ignifuges dans les transformateurs électriques. Il peut également s'agir de substances produites de manière non intentionnelle, comme par exemple les dioxines (issues de l'incinération, de combustibles ou encore de la fabrication de pesticides). Ils figurent en bonne place sur la liste des prétendants aux substances susceptibles de générer des déséquilibres à l'échelle planétaire, car les POP sont à la fois :

- persistants, c'est-à-dire qu'ils sont très peu biodégradables (la nature ne possède pas les « outils » nécessaires pour les dégrader et les assimiler) ;
- bioaccumulables, c'est à dire que les organismes vivants qui les assimilent les accumulent tout au long de leur vie (ils en contiennent donc davantage lorsqu'ils sont âgés que jeunes) ;
- bioamplificateurs, c'est à dire qu'ils se transmettent tout au long de la chaîne alimentaire, leur concentration étant par conséquent la plus forte au sommet de la chaîne trophique (prédateurs) ;
- mobiles sur de très grandes distances (car très volatiles donc mobiles dans l'eau et l'air, mais aussi bioamplificateurs donc transmissibles via la chaîne alimentaire) si bien qu'on en retrouve la présence à des distances très éloignées des sources d'émission ;
- toxiques, puisqu'ils sont susceptibles d'avoir des effets nocifs sur les organismes exposés : perturbations endocriniennes, caractère cancérigène, tératogène (atteinte des œufs ou des embryons), voire léthal.

Du fait de leur toxicité, les POP et autres éléments chimiques toxiques ont des impacts sur l'ensemble des écosystèmes touchés : par exemple, les insecticides réduisent le nombre d'insectes, ce qui impacte ensuite l'ensemble de l'écosystème. Une étude menée aux Pays-Bas montre par exemple que l'effondrement de la population d'oiseaux communs est imputable à l'usage d'insecticides néonicotinoïdes (Hallmann et al., 2014).

Des effets sanitaires préoccupants... mais souvent difficiles à établir

Situés au sommet de la chaîne alimentaire, les humains sont particulièrement exposés aux substances chimiques qui ont aujourd'hui envahi notre environnement quotidien. Mais si de nouvelles substances sont produites et diffusées sur le marché en continu, il est en revanche très rare que certaines d'entre elles soient interdites du fait de leur impact sanitaire. Car les effets de causalité entre l'exposition à une substance et l'apparition d'un trouble sont très difficiles à établir et peuvent prendre des décennies avant d'être reconnus. Le cas du glyphosate est de ce point de vue symptomatique puisqu'il est suspecté non seulement de générer des troubles de la fertilité, mais également d'être cancérigène. De nombreuses études confirmant cette suspicion ont amené en 2018 le Centre international de recherche contre le cancer de l'OMS à classer cette substance comme cancérigène probable pour l'homme. Un tel résultat



La difficile évaluation de l'effet des perturbateurs endocriniens

Plusieurs centaines de substances sont aujourd'hui suspectées de perturber le fonctionnement des glandes endocrines, qui émettent par le biais du sang certaines hormones chargées de réguler et de contrôler l'organisme. La perturbation de ce système de régulation peut avoir des effets systémiques sur l'ensemble du fonctionnement du corps humain, ce qui explique pourquoi les perturbateurs endocriniens sont suspectés d'être impliqués dans de très nombreuses maladies chroniques.

Les perturbateurs endocriniens sont présents dans des produits aussi divers que des pesticides, des plastiques, ou encore des médicaments. Présents presque partout dans notre environnement, les perturbateurs endocriniens n'obéissent pas aux règles de la toxicologie classique symbolisées par le principe de Paracelse selon lequel « la dose fait le poison ».

Dans le cas des perturbateurs endocriniens, de nouveaux facteurs doivent être pris en compte, notamment l'âge d'exposition – la période de maternité étant particulièrement sensible. Cette caractéristique fait dire à certains que, en matière de perturbateurs endocriniens, c'est en grande partie « la période d'exposition qui fait le poison ». Par ailleurs, les effets des perturbateurs endocriniens peuvent s'observer plusieurs décennies après l'exposition. Ces substances ont donc un mode de fonctionnement très éloigné de la toxicologie classique, raison pour laquelle plus de 800 substances suspectées par l'OMS (Organisation Mondiale pour la Santé) et le PNUE (Programme des Nations-Unies pour l'Environnement) sont encore très largement utilisées et diffusées en dépit des nombreuses préoccupations concernant leurs effets sur la santé (WHO & UNEP, 2012).

Quel lien avec les autres processus planétaires ?

Certaines entités nouvelles sont directement responsables des menaces de dépassement des limites planétaires : c'est le cas de l'azote actif d'origine anthropique, responsable du déséquilibre massif du **cycle biogéochimique de l'azote** ; c'est également le cas du CO₂ issu de la combustion des énergies fossiles et de différents autres gaz à effet de serre d'origine anthropique, responsables du **changement climatique** et de l'**acidification des océans** ; et c'est encore le cas des émissions de CFC, responsables de l'amincissement de la **couche d'ozone stratosphérique**.

Pour le reste, les entités nouvelles comme les substances chimiques ont un impact évident, quoi que mal mesuré, sur l'**intégrité de la biosphère**. En agissant sur les éléments situés en bas de la chaîne alimentaire, les pesticides et autres POP ont des répercussions sur l'ensemble du vivant.

aurait dû mener à restreindre ou interdire l'usage du glyphosate, comme le furent avant lui d'autres pesticides comme le DDT ou l'atrazine. Les conclusions de l'OMS ont pourtant été contredites par l'agence européenne des produits chimiques, qui a préféré fonder son avis sur d'autres études – pour la plupart non publiques et commanditées par la principale entreprise productrice du glyphosate – donnant lieu à de nombreuses polémiques (Moreira, 2017).

Cette difficulté à établir des liens entre l'exposition à une substance et le développement de pathologies est accrue par la multiplication des substances chimiques, qui peuvent interagir entre elles et avoir des effets synergiques inattendus (parfois appelés « effets cocktail »). Plus encore, la toxicologie classique est aujourd'hui bousculée par la découverte des mécanismes liés à l'épigénétique, qui ne répondent pas aux règles classiques de la toxicologie et rendent partiellement caduques les méthodes d'évaluation des impacts sanitaires des substances chimiques, en particulier lorsque celles-ci sont suspectées d'être des perturbateurs endocriniens.

■ QUELLE EST LA VARIABLE DE CONTRÔLE RETENUE ?

Compte tenu de la diversité des éléments et des problématiques considérés, aucune variable de contrôle n'est aujourd'hui disponible pour qualifier et quantifier la présence d'entités nouvelles dans notre environnement. Will Steffen et ses collègues notent qu'il n'existe pas de consensus suffisant pour établir une analyse globale des pollutions chimiques et de leurs effets sur les équilibres du système Terre – et par conséquent pas de variable de contrôle satisfaisante. Ils ajoutent qu'« *il y a peut-être également peu d'intérêt à définir des valeurs limites et des variables de contrôle pour une limite planétaire d'une telle complexité. Néanmoins, les entités nouvelles représentent une menace potentielle de rupture du fonctionnement du système Terre et la société a besoin d'apprendre à réduire ces risques inconnus et à gérer les substances chimiques dans un contexte d'incertitude.* » (Steffen et al., 2015).

Il n'est pas exclu que la découverte des effets d'une substance (ou d'une famille de substances) amène à l'avenir à définir une variable de contrôle – comme ce fut le cas par exemple des substances affaiblissant la couche d'ozone lorsque leurs effets sur la stratosphère furent découverts. L'absence actuelle d'une variable de contrôle témoigne du caractère en devenir de cette catégorie un peu à part que sont les entités nouvelles : elles représentent une « réserve de menaces potentielles » pour le système Terre non encore identifiées. Des travaux ont permis de mieux cerner les caractéristiques des substances chimiques qui pourraient à l'avenir être considérées comme étant une menace planétaire. Trois conditions sont identifiées :

- 1) que cette substance chimique ait un effet disruptif sur un processus vital du système Terre ;
- 2) que cet effet ne soit pas connu avant de devenir un problème à l'échelle mondiale ;
- 3) que cet effet ne soit pas aisément réversible (Breitholtz et al., 2014).

De telles caractéristiques permettraient alors d'identifier une variable de contrôle et, peut-être, de définir une limite.


■ QUELLE EST LA FRONTIÈRE PLANÉTAIRE ? **non définie**

■ QUELLE EST LA VALEUR ACTUELLE ? **non définie**

Figure 2 : Conseils généraux pour éviter les perturbateurs endocriniens
(Source : « Guide des perturbateurs endocriniens » de WECF France, 2019, avec leur aimable autorisation)

Conseils généraux

- Moins c'est mieux ! Ne choisissez que le nécessaire, évitez le superflu
- Lors de vos achats, recherchez les labels suivants :



- Évitez les produits en PVC
- Préférez le verre, l'acier inoxydable et la céramique plutôt que les plastiques
- Posez des questions dans les magasins et lisez les étiquettes (ingrédients, indications « sans », précisions d'usage, usages déconseillés, etc.)
- A la maison : aérez au moins 10 minutes 2 fois par jour

Nom	Comment le reconnaître ?	Articles de puériculture	Jouets	Produits cosmétiques	Alimentation	Emballages	Textiles, vêtements
Alkylphénols	S'adresser aux fabricants	B	B			B	B
Bisphéno A (BPA)	«PC» dans un triangle *	A	A			A/B	
Butylhydroxyanisol (BHA)	Dans les aliments : E320				A		
Composés organostaniques	Pas d'étiquetage	B	B				B
Composés perfluorés	Pas d'étiquetage (PFOA, DiPAP dans le papier sulfurisé, PFDS, PFNA, PFHxS)					B	B
Filtres UV	Benzophénone-3, 4-méthylbenzylidène-camphor, 4,4-dihydroxybenzophénone, benzophénone, ethylexyl methoxycinnamate, octocrylène			A			B
Parabènes	Dans les cosmétiques : butylparaben, propylparabens, dans les aliments : E214, E215, E218, E219			A	A	B	
Phtalates	Pas d'étiquetage. Éviter le PVC ou chiffre 3 dans un triangle	B	B	B		B	B
Resorcinol	Étiqueté (teintures pour cheveux)			A			

A : identifiable sur le produit, consulter la liste des ingrédients / les étiquettes
B : non indiqué sur le produit, s'adresser au fabricant/distributeur pour connaître la composition

* Les plastiques 7 ne contiennent pas tous du BPA.

QUE PEUT-ON FAIRE ?

Apprendre à gérer les incertitudes

Le principe de précaution est souvent présenté comme l'outil le plus approprié pour gérer la prise de décision dans un contexte d'incertitude. Formulé dans la déclaration de Rio de Janeiro, il prévoit que, « en cas de risque de dommages graves ou irréversibles, l'absence de certitude scientifique absolue ne doit pas servir de prétexte pour remettre à plus tard l'adoption de mesures effectives visant à prévenir la dégradation de l'environnement. » Face à une substance dont les effets sur la nature ou la santé humaine sont suspectés d'être graves ou irréversibles, son application suppose non pas une inaction, mais au contraire le développement des connaissances sur les effets de la substance en question.

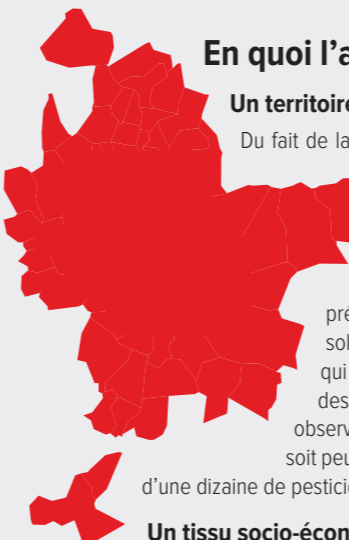
Dans le domaine des produits chimiques, le principe de précaution a trouvé une application concrète avec l'élaboration de la directive européenne REACH, dont l'objectif est de « mieux protéger la santé humaine et l'environnement contre les risques liés aux substances chimiques, tout en favorisant la compétitivité de l'industrie chimique de l'UE. » Concrètement, le règlement REACH, impute la charge de la preuve aux entreprises, qui doivent « identifier et gérer les risques liés aux substances qu'elles fabriquent et commercialisent dans l'UE. Elles doivent montrer à l'ECHA (agence européenne des produits chimiques) comment la substance peut être utilisée en toute sécurité et communiquer les mesures de gestion des risques aux utilisateurs » (ECHA, 2019). Les substances révélant un danger avéré ne sont toutefois pas systématiquement interdites : leur usage peut être restreint ou soumis à une autorisation préalable ; les industriels peuvent également continuer à utiliser ces substances s'ils ne savent pas les remplacer et s'ils montrent qu'ils gèrent le risque et qu'ils travaillent à la conception de substituts. Ces dispositions sont évidemment très critiquées par les écologistes, qui y voient une concession faite aux industriels rendant le dispositif caduque (Nicolino, 2014).

Favoriser les alternatives aux produits chimiques

Face aux difficultés que rencontrent les législateurs à encadrer l'usage des produits chimiques, de nombreux mouvements de la société civile s'organisent pour informer les citoyens sur les dangers de ces substances mais aussi les alternatives disponibles. En France, le lobbying exercé par le *Réseau Environnement Santé et Générations Futures* a par exemple participé à l'interdiction du Bisphénol A ou la promulgation d'une loi interdisant l'usage des produits phytosanitaires par les collectivités territoriales dans les espaces publics. Le développement de l'agriculture biologique, qui interdit l'usage de produits chimiques, témoigne également d'une volonté des consommateurs de ne plus être exposés à ces substances. Le secteur de l'agriculture biologique connaît ainsi une croissance annuelle de son chiffre d'affaire de près de 20 % depuis plusieurs années (Agence Bio, 2017).

Les acteurs associatifs agissent également auprès des particuliers afin de les aider à identifier les produits de consommation courante qui contiennent des produits chimiques problématiques comme les perturbateurs endocriniens. Le WECF publie par exemple de nombreux guides (cf. Figure 2, p.99) permettant aux consommateurs de faire les bons choix, par exemple : privilégier certains labels, éviter les produits en PVC, favoriser les produits en verre ou en céramique à la place des plastiques, etc. (WECF France, 2019)

En quoi l'agglomération lyonnaise est-elle concernée ?



Un territoire exposé aux pollutions chimiques

Du fait de la présence de plusieurs entreprises classées Seveso, la métropole de Lyon est exposée au risque de pollution chimique en cas d'incident. Une dizaine de plans de prévention des risques technologiques sont mis en œuvre sur le territoire autour des entreprises classées Seveso « seuil haut » : ils visent à protéger les riverains, à réduire les risques et à définir les règles d'occupation des sols en conséquence. La base de données nationale BASOL recense par ailleurs, dans le département du Rhône, 314 sites et sols pollués (ou potentiellement pollués) appelant une action des pouvoirs publics, à titre préventif ou curatif. La métropole est par exemple concernée par la pollution aux PCB, que ce soit dans les sols de certains anciens sites industriels mais aussi dans les sédiments et eaux du Rhône et de la Saône, ce qui a mené la préfecture à interdire la consommation de certains poissons prélevés dans ces rivières (Robin des bois, 2016). Des dépassements de seuil d'autorisation d'émissions de dioxine ont également pu être observés à certaines périodes sur des incinérateurs de la métropole (Florin, 2012). Bien que l'activité agricole soit peu présente, une campagne de mesures réalisée en 2013-14 relevait la présence dans l'air de la métropole d'une dizaine de pesticides différents.

Un tissu socio-économique impliqué dans les sources du problème... et à impliquer dans sa solution ?

La Vallée de la Chimie est reconnue comme étant le berceau historique de l'industrie chimique depuis les années 1850. Les entreprises qui la composent, représentant 10 000 emplois, dont 3 000 chercheurs, font inévitablement partie des systèmes socio-industriels qui conduisent, directement ou non, à la mise sur le marché de molécules impliquées dans la pollution chimique. Pour assurer la pérennité de leur activité, les entreprises doivent aujourd'hui s'interroger sur la toxicité des molécules qu'elles génèrent dans le cadre de leur activité. Certaines sont aujourd'hui engagées, avec la Métropole de Lyon, dans une réflexion sur la transition de leurs activités (« appel des 30 »). Dans le même ordre d'idées, on note un accroissement de la demande de produits issus de l'agriculture biologique, à laquelle les agriculteurs locaux commencent à répondre : en 2016, 514 hectares étaient déclarés en agriculture biologique ou en conversion, contre 41 hectares seulement en 2009 (Grand Lyon, 2019).

Des pollutions également présentes dans l'environnement intérieur

Le diagnostic santé-environnement des habitants de la métropole de Lyon réalisé en 2018 montre que l'exposition des populations à certaines substances se fait également dans l'environnement quotidien, à l'intérieur des logements ou lieux de travail (ORS, CEREMA, 2017). Le plomb et l'amiante sont par exemple encore présents dans de nombreux bâtiments. Les polluants chimiques sont également très présents dans notre quotidien. La nécessité de protéger les populations les plus sensibles vis-à-vis des perturbateurs endocriniens a par exemple mené certaines maternités et crèches du Grand Lyon à former les personnels et informer les parents afin de limiter l'exposition des femmes enceintes et des jeunes enfants aux principales sources de contamination. De nombreuses communes de la Métropole se sont également engagées à intégrer une part grandissante de produits issus de l'agriculture biologique dans la restauration scolaire, en s'appuyant sur les services d'une coopérative d'agriculteurs biologiques du Département (Bio A Pro).



BIBLIOGRAPHIE

- Agence Bio, 2017. La Bio en France, des producteurs aux consommateurs. Les carnets de l'Agence Bio, Montreuil. - http://www.agencebio.org/sites/default/files/upload/documents/4_Chiffres/BrochureCC/cc2016_france_1.pdf
- Breitholtz et al., 2014. « Identifying Chemicals That Are Planetary Boundary Threats » Environmental Science & Technology, n°48, pp. 11057-11063. - https://www.academia.edu/14078020/Identifying_Chemicals_That_Are_Planetary_Boundary_Threats
- Cicoiella A., 2013. « Toxique planète. Le scandale invisible des maladies chroniques », Seuil, Paris.
- ECHA – European Chemical Agency, 2019. « Comprendre REACH » article mis en ligne sur le site de l'ECHA, non daté. - <https://echa.europa.eu/fr/regulations/reach/understanding-reach>
- Florin M. 2012. « Pollution à la dioxine à l'usine d'incinération de Rillieux », Le Progrès, 21 septembre 2012. - <https://www.leprogres.fr/rhone/2012/09/21/pollution-a-la-dioxine-a-l-usine-d-incineration-de-rillieux>
- Grand Lyon, 2019. « L'observatoire métropolitain du développement durable. Où en est le territoire de la métropole de Lyon ? », Grand Lyon, Agence d'urbanisme urbalyon.
- Greenpeace, 2008. « Les polluants organiques persistants ». Greenpeace Suisse. - https://www.greenpeace.ch/wp-content/uploads/2017/01/2008_Chimie_Fiche_POP.pdf
- Hallmann et al., 2014. « Declines in insectivorous birds are associated with high neonicotinoid concentrations » Nature, n°511, pp. 341-343. - <https://www.nature.com/articles/nature13531>
- Moreira E., 2017. « Le glyphosate est-il cancérigène ? La communauté scientifique toujours divisée », Les Echos, 15 mars 2017. - https://www.lesechos.fr/15/03/2017/lesechos.fr/0211882253400_le-glyphosate-est-il-cancerigene--la-communaute-scientifique-toujours-divisee.htm
- Nicolino F., 2014. Un empoisonnement universel. Comment les produits chimiques ont envahi la planète. Les Liens qui libèrent », Paris.
- ORS & CEREMA, 2017. Diagnostic Santé Environnement des habitants de la Métropole de Lyon », Métropole de Lyon, Lyon.
- Robin des bois, 2016. « Septième Atlas des sites terrestres pollués aux PCB », mis en ligne le 26 avril 2016 sur le site de Robin des Bois. - <http://www.robindesbois.org/7eme-atlas-des-sites-terrestres-pollues-aux-pcb-mise-a-jour-avril-2016/> Et <http://www.robindesbois.org/atlas-des-sites-aquatiques-contamines-par-les-pcb/>
- WECF, 2019. « Protéger les enfants en évitant les substances chimiques ». Guide WECF. Ed. WECF France, Annemasse. - <https://wecf-france.org/ressources/guides-et-fiches/>
- WHO & UNEP - World Health Organization, United Nations Environment Programme, 2012. « State of the science of endocrine disrupting chemicals », WHO, Genève. - <http://www.who.int/ceh/publications/endocrine/en/>

CONCLUSION : UNE APPROCHE SYSTÉMIQUE DES ENJEUX PLANÉTAIRES ET DES POLITIQUES PUBLIQUES

Les dix fiches issues des travaux dirigés par Johan Rockström mettent en lumière la complexité des défis que l'humanité doit relever si elle veut préserver ses conditions de vie actuelles. Une difficulté majeure réside dans les boucles de rétroactions qui fondent le « système-Terre », comme évoqué en introduction et au cours de chaque fiche (rubriques « quels liens avec les autres limites ? »). La figure 1 retrace de manière synthétique les liens entre les différentes limites planétaires. Ainsi, même si nous avons privilégié un format « par fiche » pour faciliter la lecture, ce choix ne doit pas occulter l'idée que la plupart des problèmes font système et doivent faire l'objet d'actions concertées pour parvenir à endiguer les dépassements en cours ou à venir des limites planétaires.

Face à ces enjeux, où en est la Métropole de Lyon ? Les différentes fiches ont permis de préciser la situation à l'échelle de l'agglomération lyonnaise. Si de nombreuses initiatives sont mises en œuvre – réalisées, en cours, ou sur le point de démarrer comme le montre le tableau ci-contre (cf. Figure 2) –, force est de constater que la situation est loin d'être réglée si l'on se place à l'échelle du système-Terre. L'apport principal de la logique systémique est en effet de décentrer le regard, en ne le focalisant plus simplement sur les compétences d'une collectivité comme la Métropole (même si son action dans le cadre de ses compétences doit perdurer), mais en élargissant au contraire son échelle de responsabilité. Autrement dit, la plupart des fiches convergent vers l'importance de l'empreinte environnementale des consommateurs (empreinte carbone, azote, phosphore, eau de produits importés), ce qui est a priori en dehors des compétences d'une collectivité locale. Ainsi, comment la collectivité peut-elle affirmer sa légitimité à agir sur ces domaines ? Puisqu'elle ne pourra faire tout, toute seule, comment peut-elle mobiliser des partenaires pour engager une action commune ? Enfin, dans quelle mesure l'entrée par les limites planétaires peut-elle être une grille de lecture fédératrice pour mobiliser et agir ?

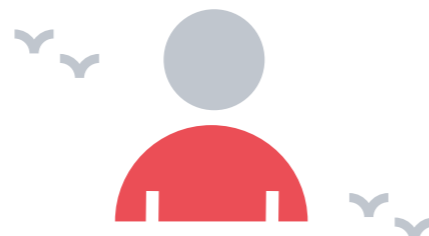


Figure 1 : Synthèses des rétroactions du système terre (conception : skoli, les Zinc)

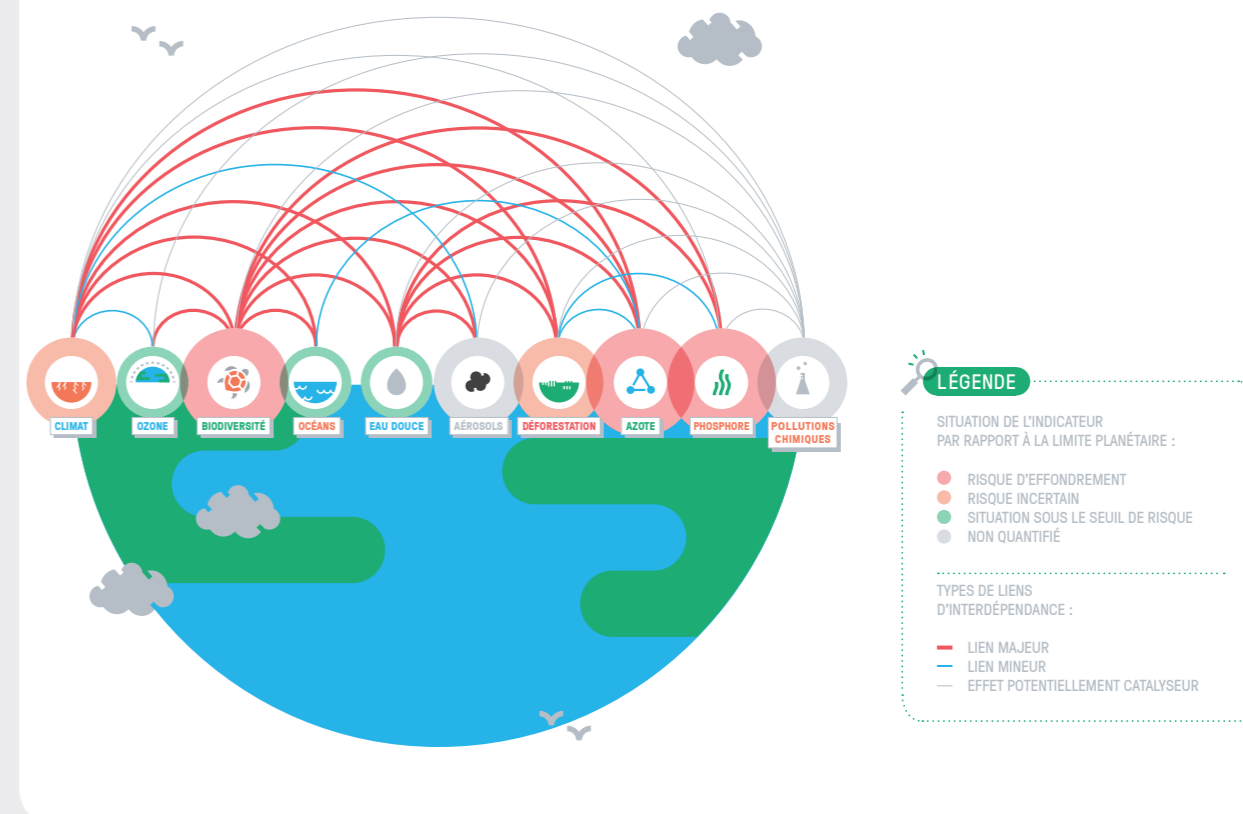


Figure 2 : Synthèse des principales politiques métropolitaines liées aux limites planétaires (non exhaustif)

Principaux plans et stratégies de la Métropole de Lyon (non exhaustif)	Emissions de CO ₂ et ses effets (changement climatique, acidification de l'océan)	Perturbation du cycle de l'azote et du phosphore	Pollutions aux aérosols, appauvrissement de la couche d'ozone	Artificialisation des sols, cycle de l'eau douce et protection de la biodiversité	Pollutions chimiques
Environnement Plan Climat Air Energie Territorial	- Réduction des émissions de CO ₂ de l'industrie, du transport, de l'habitat	- Réduction des émissions de NOx		- Mesures de désimperméabilisation des sols	
Mobilité Plan Oxygène, déclasser de l'A6/A7, covoiturage	- Réduction des émissions de CO ₂	- Réduction des émissions de NOx	- Lutte contre les émissions de particules fines		
Energie Schéma Directeur des énergies	- Promotion des énergies renouvelables - Rénovation thermique (Ecorénov)		- Remplacement chauffage au bois (primaire bois)		
Urbanisme PLU-H, Trame verte, trame bleue, Plan Canopée, espaces verts	- Îlots de fraîcheur, forêt urbaine ombragée			- Contrôle de l'artificialisation des sols - Gestion des eaux pluviales - Protection des espèces via les corridors terrestres et aquatiques - Zéro Phyto	- Zéro phyto
Eau potable Schéma général d'assainissement	- Maîtrise de l'étiage du Rhône (canicules)	- Stations d'épurations généralisées et améliorées (azote et phosphore)		- Maîtrise de la consommation d'eau, amélioration du rendement du réseau - Maîtrise de l'étiage du Rhône	
Agriculture et alimentation Mesures Agro-Environnementales et Climatiques, stratégie santé-environnement		Limitation des entrants de matières azotées dans les sols agricoles			Promotion du bio (cantines)
Autres politiques			Déchets : Traitement et recyclage des CFC (ozone)		Social : actions anti perturbateurs endocriniens (crèches, maternités...) Appel des 30 : lutte contre la pollution dans la Vallée de la Chimie

WWW.

RETROUVEZ
TOUTES LES ÉTUDES SUR

MILLENAIRE3.

COM

MÉTROPOLE DE LYON
20, RUE DU LAC
CS 33569
69505 LYON CEDEX 03