

APRIL 2019

Funded by



STIFTUNG
MERCATOR

Deutsche Bundesstiftung Umwelt

GLOBAL ENERGY SYSTEM BASED ON 100% RENEWABLE ENERGY

Power, Heat, Transport and Desalination Sectors

Executive Summary (French)



Study by



P.O.Box 20
FI-53851 Lappeenranta
Finland
Tel.: +358 408171944
Email: manish.thulasi.ram@lut.fi

Albrechtstr. 22
10117 Berlin
Germany
Tel.: +49 30 609 898 810
Email: office@energywatchgroup.org

Résumé exécutif

Les changements climatiques ont un impact croissant sur tous les continents de la planète. Les effets néfastes du changement climatique devraient s'aggraver considérablement avec une augmentation de la température de 2 ° C au-dessus des niveaux préindustriels. Limiter le réchauffement de la planète à 1,5 ° C d'ici le milieu du siècle pourrait réduire l'exposition aux risques liés au climat et à la vulnérabilité dérivée des contraintes économiques. Un changement rapide et profond est nécessaire dans tous les secteurs émetteurs de carbone de l'économie mondiale, plus particulièrement dans le secteur de l'énergie, qui est le principal contributeur aux émissions de gaz à effet de serre (GES). La communauté mondiale doit, de toute urgence, rechercher collectivement une voie menant à l'annulation des émissions nettes de GES en lançant une transition rapide du secteur de l'énergie. De nombreux pays et régions n'ont pas encore élaboré de plan pour aligner leurs actions à court terme et leurs objectifs énergétiques à long terme sur le degré d'ambition requis pour atteindre les objectifs de l'Accord de Paris.

Cette étude, menée par l'Université finlandaise LUT (LUT) et le groupe de veille énergétique Energy Watch Group (EWG), présente une première voie de transition énergétique du genre, riche en technologies, multisectorielle, multirégionale et économique. Dirigée par le Dr Christian Breyer, une équipe de 14 scientifiques parmi les plus importants au monde dans le domaine de la transition énergétique a mené l'étude sur une période de quatre ans et demi. À l'aide de la simulation de modélisation de la transition énergétique de pointe de LUT, des résolutions géo-spatiales horaires complètes ont été utilisées pour calculer la combinaison optimale des coûts en technologies basée sur les sources d'énergie renouvelables disponibles localement. Les

recherches menées dans le cadre de cette étude fournissent des simulations de systèmes énergétiques optimisées en termes de coûts pour 145 régions du monde. L'étude a regroupé le monde en neuf grandes régions. Il s'agit d'un projet techno-économique qui vise à déterminer le mix énergétique le moins coûteux et le plus réalisable avec la transition des secteurs mondiaux de l'énergie, de la chaleur, des transports et du dessalement vers un niveau zéro d'émissions nettes de GES d'ici 2050.

L'étude montre qu'un système d'énergie 100% renouvelable peut être atteint au niveau mondial avec des émissions nettes nulles de GES avant 2050 pour un coût inférieur au système actuel utilisant des combustibles fossiles et du nucléaire. Le photovoltaïque solaire (PV) et l'énergie éolienne apparaissent comme les nouveaux atouts du futur système énergétique mondial. Le solaire photovoltaïque apparaît comme la source d'approvisionnement en électricité la plus importante, destinée à représenter environ 69% de l'approvisionnement total en énergie d'ici 2050, complété par l'énergie éolienne à 18%, l'hydroélectricité à 3% et la bioénergie à 5%. Cela se traduira par une capacité installée totale d'environ 63 400 gigawatts d'énergie solaire photovoltaïque et de 8 000 gigawatts d'énergie éolienne dans le monde d'ici 2050. Les utilisateurs de systèmes photovoltaïques conduiront une transition énergétique plus décentralisée dans les différentes régions du monde, contribuant à environ 19% de la génération d'électricité. L'approvisionnement en énergie renouvelable à faible coût permet l'électrification dans les secteurs de l'électricité, de la chaleur, des transports et du dessalement. Un système d'énergie 100% renouvelable est plus efficace et plus compétitif sur le plan des coûts que le système actuel basé sur les combustibles fossiles et le nucléaire.

La demande d'énergie

Un changement fondamental dans le secteur de l'énergie est en train de façonner la transition énergétique, qui repose actuellement principalement sur les combustibles fossiles. Comme l'indique la figure ES-1, l'électrification dans le secteur de l'énergie comprenant l'électricité, la chaleur, le transport et le dessalement, donne une part d'énergie primaire

avec 90% d'électricité renouvelable d'ici 2050 et zéro combustible fossile. Cela représente un changement absolu par rapport à l'approvisionnement en énergie primaire du système énergétique de 2015, qui dépendait principalement des combustibles fossiles (89%) et seulement à hauteur de 4% des sources d'origine renouvelable.

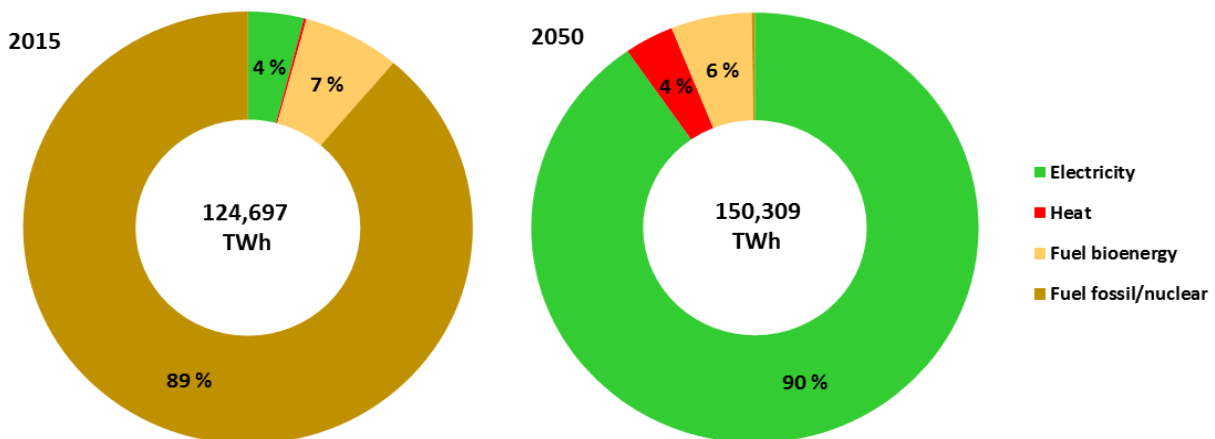


Figure ES-1: Parts des principaux combustibles dans la demande totale d'énergie primaire à l'échelle mondiale, en 2015

Un taux de croissance annuel moyen cumulé global d'environ 1,8% de la demande finale en énergie déclenche la transition (voir la figure ES-2). Cette évolution dérive de la croissance de la demande de services liés à l'énergie, notamment l'électricité et le chauffage, l'eau dessalée et le transport, ainsi que de technologies de conversion et d'efficacité axées sur la demande plus efficaces. L'électrification complète augmente massivement l'efficacité énergétique globale, ce qui implique un taux de croissance encore plus élevé des services énergétiques fournis. La demande en énergie primaire passe d'environ 125 000 TWh en 2015 à

près de 105 000 TWh en 2035 et dépassera les 150 000 TWh en 2050. À titre de comparaison, les pratiques actuelles et le faible taux d'électrification se traduiraient par une demande en énergie primaire de près de 300 000 TWh en 2050 (voir Figure ES-2). Ce gain massif en efficacité énergétique est dû principalement au niveau élevé d'électrification, environ 90% de la demande en énergie primaire, et permettra d'économiser près de 150 000 TWh par rapport à la situation à laquelle porterait la poursuite des pratiques actuelles avec de faibles parts d'électrification.

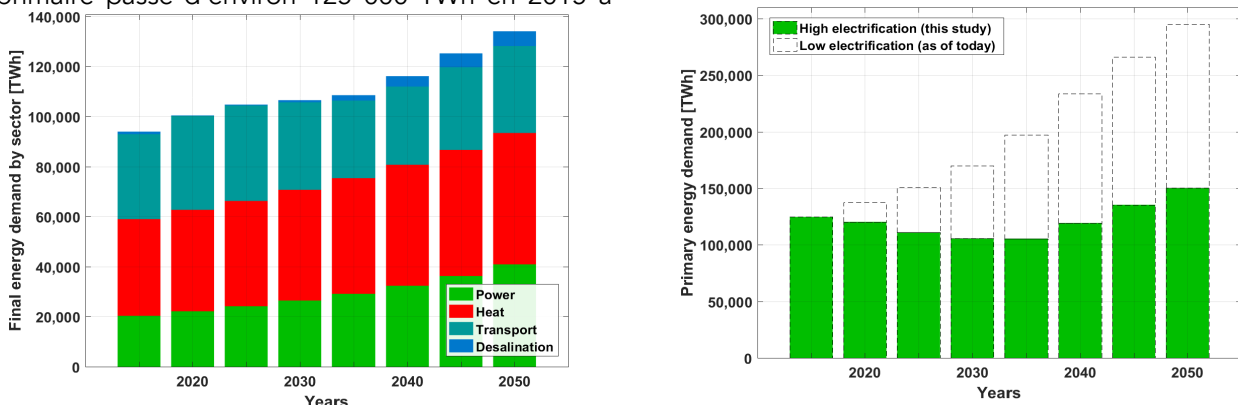


Figure ES-2: La demande sectorielle en énergie finale pendant la transition (à gauche) et la demande en énergie primaire avec une électrification élevée et une électrification faible pendant la transition (à droite).

Approvisionnement en énergie primaire

Alors que la part de l'énergie renouvelable augmente d'environ 10% en 2015 à 100% d'ici 2050, l'approvisionnement en énergie primaire se déplace de plus en plus en faveur de l'électricité. Les énergies solaire photovoltaïque et éolienne apparaissent comme les sources d'approvisionnement en électricité les plus importantes, avec environ 76% et 20% respectivement de l'approvisionnement total en électricité primaire d'ici 2050 dans les secteurs de

l'énergie, de la chaleur, des transports et du dessalement (voir la figure ES-3). Le photovoltaïque solaire comprend des centrales photovoltaïques sur toitures, des centrales photovoltaïques à orientation fixe et à inclinaison fixe. En outre, l'hydroélectricité contribue à environ 3%, la biomasse à 6%, la géothermie à 2% et les autres énergies renouvelables à 2%, au mix énergétique le moins coûteux en 2050.

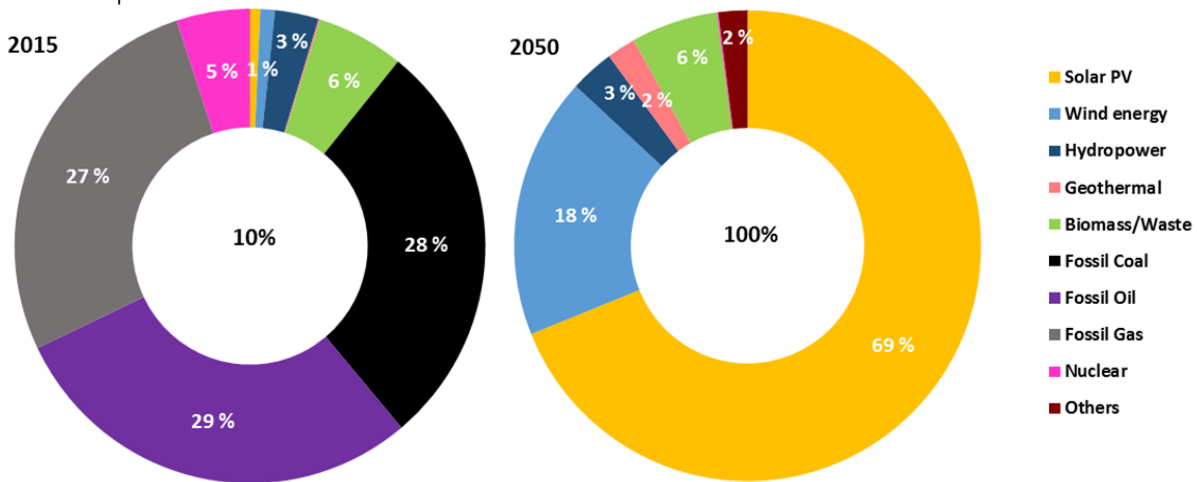


Figure ES-3: Parts de l'offre d'énergie primaire dans les secteurs de l'électricité, de la chaleur, des transports et du dessalement en 2015 et 2050.

Approvisionnement en chaleur

L'approvisionnement en chaleur passe de 85% de combustibles fossiles en 2015 à 100% d'énergie renouvelable en 2050. Les pompes à chaleur jouent un rôle important, environ 44% du marché, suivies du chauffage électrique direct à 26% et de la biomasse, qui représente 12% du mix (voir la figure

ES-4). De plus, le gaz à base renouvelable constitue environ 12% de la chaleur fournie en 2050. Le gaz utilisé comme combustible passe des combustibles fossiles extraits au gaz synthétique produit par l'électricité renouvelable avec du biométhane tout au long de la transition.

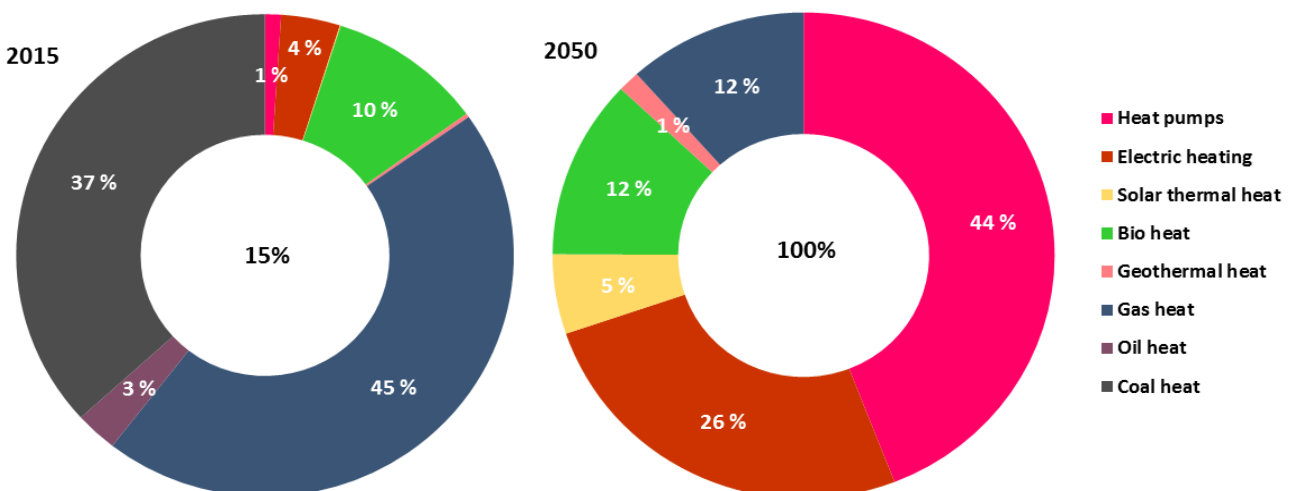


Figure ES-4: Parts de fourniture de chaleur en 2015 et 2050.

Stockage d'énergie

Le stockage de l'énergie joue un rôle essentiel dans la transition du système énergétique mondial vers 100% d'énergies renouvelables. Une combinaison des technologies de stockage de l'électricité et de la chaleur couvre la demande en

énergie tout au long de la période de transition (voir la figure ES-5). Le stockage de l'énergie couvre environ 23% de la demande d'électricité et environ 26% de la demande de chaleur en 2050.

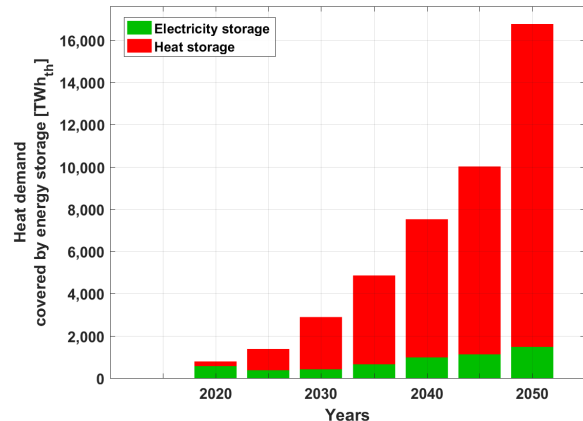
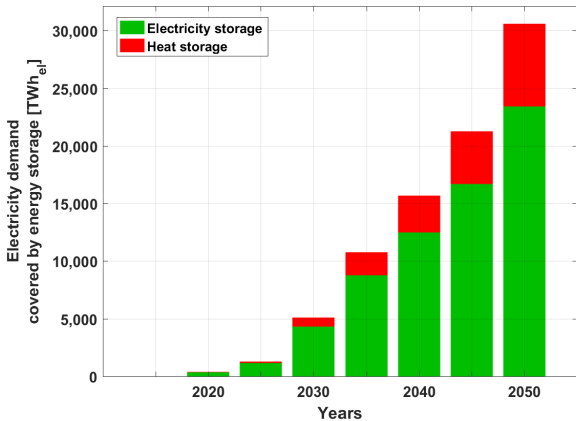


Figure ES-5: Stockage d'énergie pendant la période de transition de 2015 à 2050 pour la demande d'électricité (à gauche) et la demande de chaleur (à droite).

Production de carburant synthétique

La production de carburants synthétiques est un aspect essentiel pour obtenir un système d'énergie 100% renouvelable. Les technologies de conversion de carburant telles que Fischer-Tropsch, l'électrolyse de l'eau, la méthanisation et d'autres fournissent des carburants basés sur des énergies renouvelables tout au long de la transition énergétique. Outre les biocarburants produits de manière durable, tels que les plantations de jatropha sur des terres dégradées, l'électrification et les carburants synthétiques à base d'énergies renouvelables garantissent un secteur des transports basé sur une énergie 100% renouvelable dans les différentes régions du monde. Les capacités correspondantes des technologies de

production de carburants sont progressivement intégrées à partir de 2035 (voir la figure ES-6).

La gestion de la chaleur joue un rôle essentiel dans la production efficace de carburants synthétiques. La chaleur récupérée peut fournir une part importante de l'énergie nécessaire à la capture directe de CO₂ par l'air, qui à son tour fournit le carbone de l'atmosphère pour la production de carburants synthétiques. L'utilisation de la chaleur récupérée et de l'excès de chaleur est essentielle pour une transition énergétique optimale en termes de coûts dans le secteur des transports. Cet aspect acquiert une importance considérable après 2035 (voir la figure ES-6).

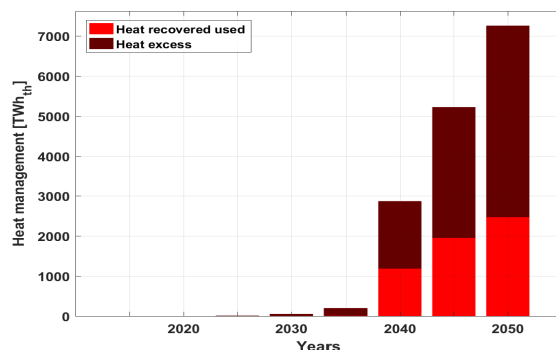
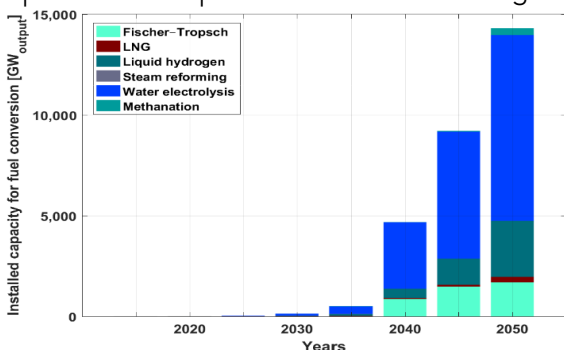


Figure ES-6: Capacités installées des technologies de conversion de combustible (à gauche) et de la gestion de la chaleur (à droite) pendant la transition énergétique de 2015 à 2050

Coûts énergétiques et investissements

Le passage à un système utilisant 100% d'énergies renouvelables entraîne un coût de l'énergie normalisé et stable dans les différentes régions du monde tout au long de la transition. Le coût de l'énergie normalisé pour un système énergétique mondial entièrement durable reste stable dans la fourchette de 50 à 57 € / MWh tout au long de la transition de 2015 à 2050 (voir la figure ES-7). Une tendance se dessine où le coût normalisé des actions énergétiques est de plus en plus dominé par les coûts en capital, les coûts du carburant perdant de l'importance pendant la période de transition. La diversification énergétique et

l'autonomie locale pourraient être accrues dans les différentes régions du monde d'ici 2050.

Les investissements dans le secteur de l'énergie augmentent au cours de la transition et sont bien répartis sur une gamme de technologies, avec des investissements majeurs dans l'énergie solaire photovoltaïque, l'énergie éolienne, les batteries, les pompes à chaleur et la conversion de combustibles synthétiques (voir la figure ES-7). Les investissements sont également bien répartis dans les trois principaux secteurs de l'électricité, de la chaleur et des transports jusqu'en 2050.

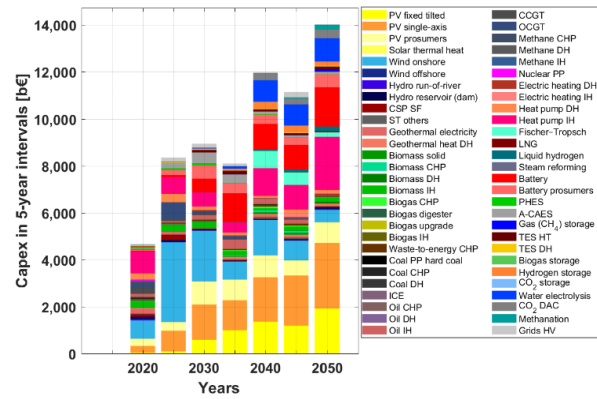
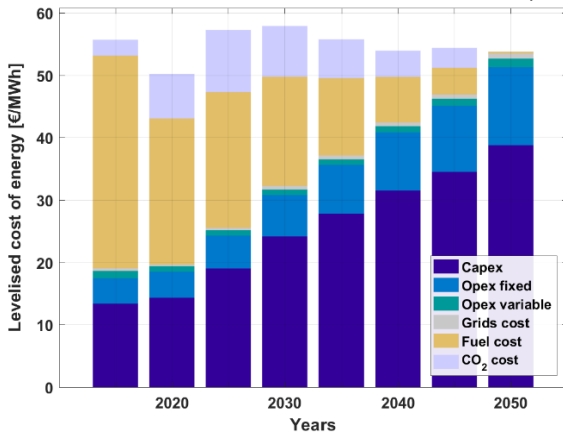


Figure ES-7: Coût normalisé de l'énergie (à gauche) et investissements tous les cinq ans (à droite) tout au long de la transition énergétique de 2015 à 2050.

Réduction des émissions

Le résultat le plus important de la transition énergétique mondiale est que les émissions de GES peuvent être réduites de près de 30 000 mégatonnes d'équivalent CO₂ (MtCO₂eq) en 2015 à zéro d'ici 2050 (voir la figure ES-8). Les

émissions de GES cumulées restantes, d'environ 422 gigatonnes d'équivalent CO₂ (GtCO₂eq), sont conformes aux ambitieux objectifs de l'Accord de Paris visant à limiter l'augmentation de la température à 1,5 °C.

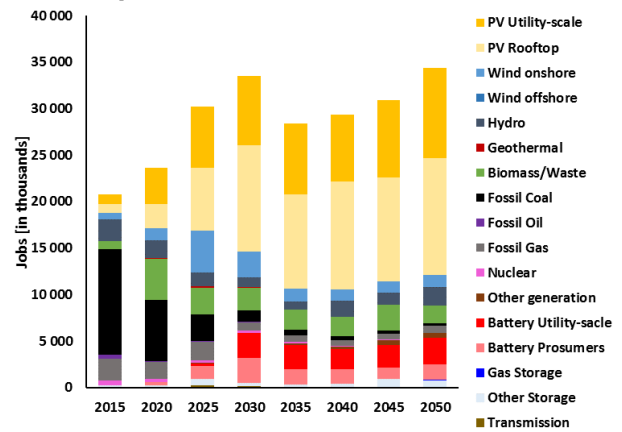
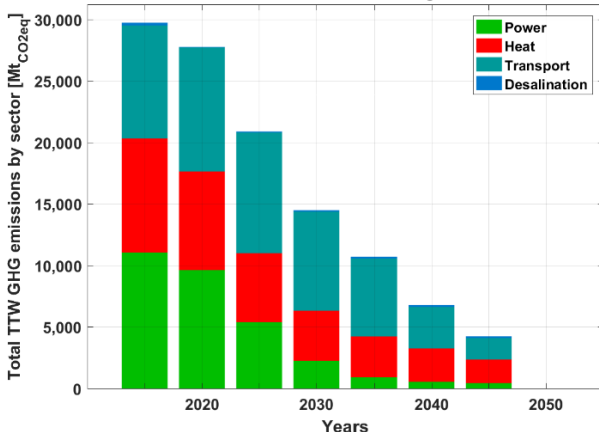


Figure ES-8: Émissions sectorielles de GES (à gauche) créées par différentes ressources énergétiques (à droite) au cours de la transition énergétique de 2015 à 2050

Création d'emplois

Environ 35 millions d'emplois d'énergie directs sont créés au cours de la transition dans le secteur de l'énergie dans les différentes régions du monde (voir la figure ES-8). Les emplois passent des secteurs des combustibles fossiles aux secteurs des énergies renouvelables et du stockage, le

photovoltaïque et les batteries fournissant la majorité des emplois dans le secteur de l'énergie d'ici 2050. Les emplois perdus dans les secteurs des combustibles fossiles sont largement compensés par la création de 15 millions d'emplois supplémentaires d'ici 2050.

Recommandations de politique

Pour atteindre un système d'énergie 100% renouvelable, des objectifs ambitieux doivent être définis et soutenus par des politiques stables, à long terme et fiables. Les cadres politiques devront être adaptés localement aux conditions et environnements régionaux sur la base de la subsidiarité. La transition énergétique peut être stimulée par :

- Les politiques de rachat, telles que les tarifs, garantissent un prix minimum par unité d'électricité ; stimuler les investissements privés et publics locaux et régionaux et à petite et moyenne échelle.
- Les procédures d'appel d'offres sont recommandées pour les projets de grande envergure d'une capacité supérieure à 40 MW. Pour les projets d'une capacité inférieure à 40 MW, des tarifs de rachat garantis devraient être appliqués pour encourager la production décentralisée.
- Exemptions fiscales, subventions directes et privilèges légaux pour les technologies des énergies renouvelables.
- Introduction de taxes sur le carbone, le méthane et la radioactivité.
- Réglementation, mandats et planification des infrastructures qui encouragent une efficacité accrue dans les bâtiments, l'éclairage, les appareils électriques, les appareils électroniques et autres charges énergétiques.
- Cogénération (en particulier bioénergie et électricité au gaz) avec récupération totale de la chaleur.
- Normaliser le terrain de jeu de l'approvisionnement énergétique en supprimant les subventions et en fixant des prix pour les externalités négatives.
- Une augmentation consistante des financements publics et privés.
- Cohérence du soutien financier des gouvernements locaux, nationaux et régionaux.
- Désinvestissement, investissement et mise en place de nouveaux mécanismes de financement innovants.
- Créer un engagement des parties prenantes dans tous les secteurs pour identifier et exploiter de manière inclusive les opportunités et éliminer les obstacles tout au long de la transition énergétique.
- Financement coopératif et modèles fondés sur des actions associés à des outils en ligne ouverts et accessibles pour surveiller les dépenses publiques (par exemple, systèmes de budgétisation participative).

→ **Les résultats sectoriels et régionaux de cette transition énergétique mondiale sont présentés dans le rapport.**