

Une économie mondiale zéro-carbone?

Synthèse du rapport

Mission réalisable

Septembre 2020

Version 1.0



Energy
Transitions
Commission

Une économie mondiale zéro-carbone ?

Mission réalisable.

L'Energy Transitions Commission (ETC) est une coalition de dirigeants du monde entier, issus des secteurs de l'énergie : producteurs d'énergie, industries à forte consommation d'énergie, fournisseurs d'équipements, acteurs financiers et ONG environnementales. Notre mission est de trouver comment construire une économie mondiale qui puisse permettre aux pays en développement d'atteindre le niveau de vie des pays développés, tout en limitant la hausse de la température moyenne dans le monde bien en-deçà de 2°C et le plus près possible de 1,5°C. Pour ce faire, le monde a besoin d'atteindre la neutralité en émissions de gaz à effet de serre (GES) d'ici le milieu du siècle.

L'ETC est coprésidée par Lord Turner Adair et par Dr Ajay Mathur. La liste des Commissaires se trouve sur la page suivante.

Le présent rapport a été élaboré par les Commissaires avec le soutien du Secrétariat de l'ETC, fourni par SYSTEMIQ. Il rassemble un ensemble de publications d'ETC, élaborées en étroite collaboration avec des centaines de spécialistes issus d'entreprises, d'initiatives industrielles, d'organisations internationales, d'organisations non gouvernementales et des milieux universitaires. Il se fonde sur un ensemble d'analyses réalisées par Climate Policy Initiative, Copenhagen Economics, Material Economics, McKinsey & Company, Rocky Mountain Institute, The Energy and Resources Institute, University Maritime Advisory Services, Vivid Economics et SYSTEMIQ pour l'ETC et en partenariat avec elle, ainsi que sur une revue de la littérature.

Nous faisons référence à des analyses particulières de l'Agence Internationale de l'Énergie et BloombergNEF. Nous remercions chaleureusement nos partenaires et collaborateurs pour leurs contributions.

Ce rapport constitue une vision collective de l'Energy Transitions Commission. Les membres de l'ETC avalisent les conclusions et arguments principaux exposés dans ce rapport, mais il ne peut être considéré qu'ils soutiennent chacun de ces résultats ou chacune de ses recommandations. Il n'a pas été demandé aux institutions auxquelles sont affiliés les Commissaires d'avaliser formellement ce rapport.

Les Commissaires de l'ETC s'accordent non seulement sur l'importance d'atteindre la neutralité carbone dans les systèmes énergétiques et industriels d'ici le milieu du siècle, mais ils partagent également une vision globale sur la manière de réaliser cette transition. Le fait qu'il soit possible de parvenir à un tel accord entre des dirigeants d'entreprises et d'organisations ayant des perspectives et des intérêts différents quant au système énergétique doit donner confiance aux décideurs du monde entier dans le fait qu'il est possible de simultanément faire croître l'économie mondiale et limiter le réchauffement climatique bien en-deçà de 2°C, et que nombre des actions essentielles pour parvenir à ces objectifs sont claires et peuvent être poursuivies immédiatement.

Pour en savoir plus :

www.energy-transitions.org
www.linkedin.com/company/energy-transitions-commission
www.twitter.com/ETC_energy

Nos Commissaires

M. Marco Alvera,
PDG – SNAM

M. Thomas Thune Anderson,
Président du Conseil d'Administration
– Ørsted

M. Brian Aranha,
Vice-Président, Responsable
de la stratégie, Directeur de la
technologie, R&D, CCM, Secteur
automobile mondial, Communications
et Responsabilité sociétale –
ArcelorMittal

Lord Gregory Barker,
Président exécutif – EN+

M. Pierre-André de Chalendar,
Président du Conseil d'administration
et PDG – Saint Gobain

Mme Marisa Drew,
Responsable mondiale de la stratégie
développement durable, conseil et
finance – Crédit Suisse

M. Dominic Emery,
Vice-Président, Stratégie du Groupe
– BP

M. Stephen Fitzpatrick,
Fondateur – Ovo Energy

M. Will Gardiner,
PDG – DRAX

M. John Holland-Kaye,
PDG – Heathrow Airport

M. Chad Holliday,
Président du Conseil d'administration
– Royal Dutch Shell

M. Timothy Jarratt,
Responsable du personnel – National
Grid

M. Hubert Keller,
Partenaire gestionnaire – Lombard
Odier

Mme Zoe Knight,
Directrice générale et directrice du
Centre des finances durables du
groupe HSBC – HSBC

M. Jules Kortenhorst,
PDG – Rocky Mountain Institute

M. Mark Laabs,
Directeur – Modern Energy

M. Richard Lancaster,
PDG – CLP

M. Li Zheng,
PDG – Institut du changement
climatique et du développement
durable, Université de Tsinghua

M. Martin Lindqvist,
PDG – SSAB

M. Auke Lont,
PDG et Président – Statnett

M. Johan Lundén,
Vice-Président Senior, Chef de la
stratégie projets et produits – Volvo
Group

Dr. Ajay Mathur,
Directeur Général – The Energy and
Resources ; Co-Président – Energy
Transitions Commission

Dr. María Mendiluce,
PDG – We Mean Business

M. Jon Moore,
PDG – BloombergNEF

M. Julian Mylchreest,
Directeur Général, Chef adjoint des
Ressources naturelles (Énergie,
électricité et mines) – Bank of America

Mme Damilola Ogunbiyi,
PDG – Sustainable Energy For All

Mme Nandita Parshad,
Directrice Générale, Sustainable
Infrastructure Group – EBRD

M. Andreas Regnell,
Premier Vice-Président,
Développement stratégique –
Vattenfall

M. Carlos Sallé,
Premier Vice-Président, Politiques
énergétiques et changement
climatique – Iberdrola

M. Siddharth Sharma,
Responsable mondial du
développement durable – Tata Sons
Private Limited

M. Ian Simm,
Fondateur et PDG – Impax

M. Mahendra Singhi,
PDG – Groupe Dalmia Bharat

Dr. Andrew Steer,
PDG – World Resources Institute

Lord Nicholas Stern,
Professeur de sciences économiques
et politiques, IG Patel – Grantham
Institute – LSE

Dr. Günther Thallinger,
Membre du bureau de direction –
Allianz

Mr. Simon Thompson,
Président du Conseil d'administration
– Rio Tinto

Dr. Robert Trezona,
Directeur Cleantech – IP Group

M. Jean-Pascal Tricoire,
Président du Conseil d'administration
et PDG – Schneider Electric

Mme Laurence Tubiana,
PDG – European Climate Foundation

Lord Adair Turner,
Co-Président – Energy Transitions
Commission

M. Huang Wensheng,
Président du Conseil d'administration
– Sinopec Capital

Sénateur Timothy E. Wirth,
Président émérite – United Nations
Foundation

M. Zhang Lei,
PDG – Envision Group

Dr. Zhao Changwen,
Directeur Général économie
industrielle – Development Research
Center of the State Council

Mme Cathy Zoi,
PDG – EVgo

Une économie prospère et neutre en émissions carbone est réalisable d'ici 2050

Bâtiments efficaces en énergie, de haute qualité

Mobilité flexible et neutre en carbone

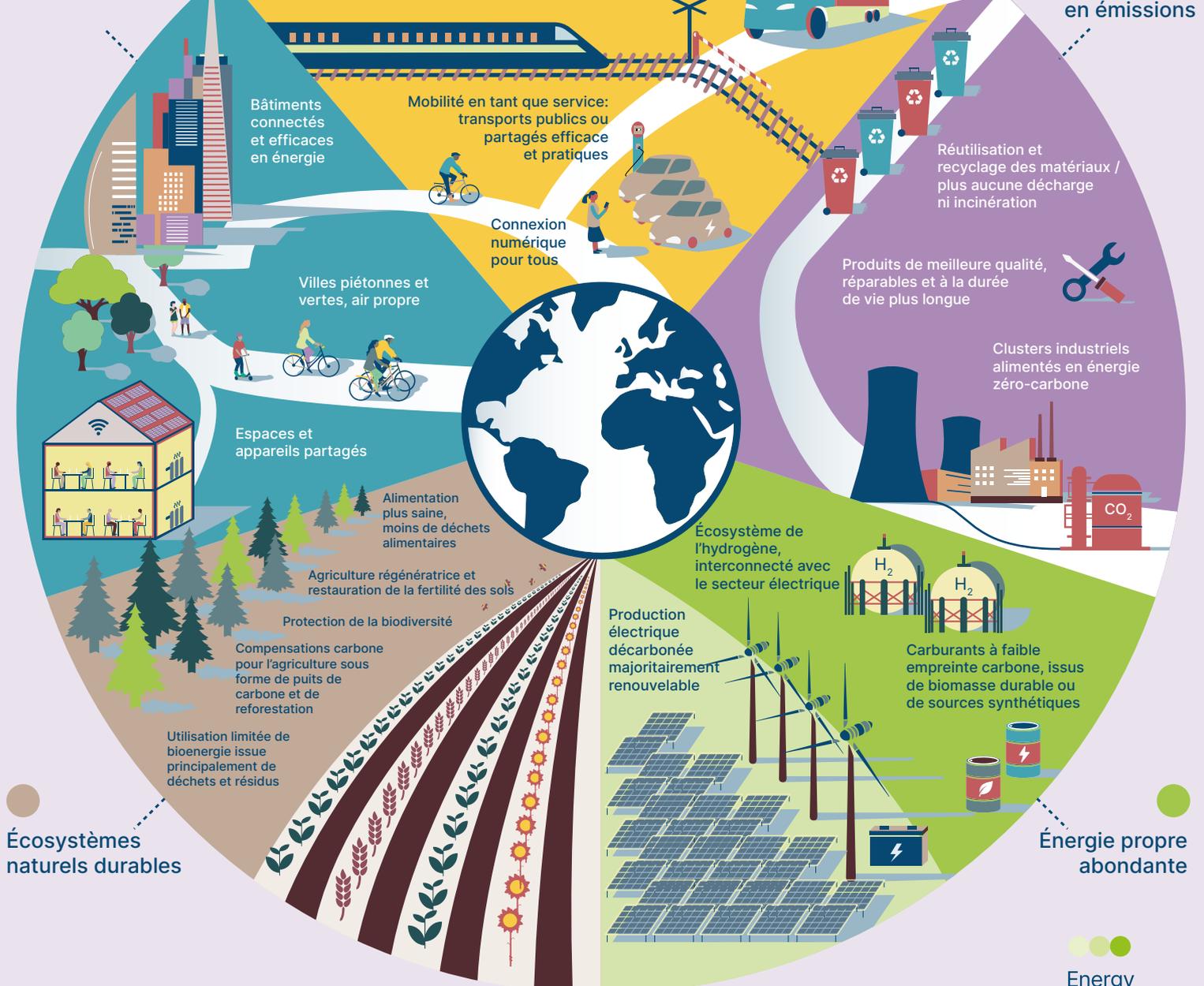
Marchandises issues de circuits circulaires et neutres en émissions

Énergie propre abondante

Écosystèmes naturels durables

Mobilité flexible et neutre en carbone

Bâtiments efficaces en énergie et de haute qualité



Écosystèmes naturels durables

Énergie propre abondante

L'**Energy Transitions Commission (ETC)** est une coalition de dirigeants du monde entier, issus des secteurs de l'énergie : producteurs d'énergie, industries à forte consommation d'énergie, fournisseurs d'équipements, acteurs financiers et ONG environnementales. Notre mission est de trouver comment construire une économie mondiale qui puisse permettre aux pays en développement d'atteindre le niveau de vie des pays développés, tout en limitant la hausse de la température moyenne dans le monde bien en-deçà de 2°C et le plus près possible de 1,5°C. Pour ce faire, le monde a besoin d'atteindre la neutralité en émissions de gaz à effet de serre (GES) d'ici le milieu du siècle.

Ces quatre dernières années, l'ETC a publié plusieurs rapports traitant du défi de la décarbonation dans ses différentes dimensions, en se concentrant soit sur un secteur spécifique comme celui de la production électrique (dans *Better Energy, Greater Prosperity*¹) et les secteurs les plus difficiles à décarboner (dans *Mission Possible*²), soit en mettant l'accent sur les défis et les opportunités au niveau de régions, comme dans les publications concernant l'Inde et la Chine.³ La conclusion générale de ces rapports est claire. **Il ne fait aucun doute qu'il est techniquement et économiquement possible d'atteindre la neutralité des émissions de GES d'ici le milieu du siècle**, sans compter de façon permanente et importante sur les achats de compensation carbone relatifs à la déforestation ou à d'autres formes de modifications des secteurs de l'agriculture, de la gestion forestière et de la gestion des sols, ou encore de techniques de production d'émissions négatives.

- **Techniquement** : Les technologies et les solutions économiques pour y parvenir existent déjà ou seront bientôt prêtes à être commercialisées.
- **Économiquement** : La réduction du pouvoir d'achat en 2050, mesuré de façon conventionnelle, sera au plus de 0,5 % et donc marginale par rapport aux conséquences néfastes majeures qu'un changement climatique non maîtrisé pourrait avoir à cette échéance.

Atteindre la neutralité des émissions de GES implique **une profonde transformation de notre système énergétique**. L'usage de combustibles fossiles non décarbonés, qui représentent actuellement plus de 80 % de la demande en énergie primaire, doit être progressivement supprimé, l'électricité propre devenant le vecteur énergétique prédominant, complété par l'hydrogène, la biomasse en quantité durable et limitée et par un usage mesuré des combustibles fossiles, associé au stockage ou à l'utilisation du CO₂ capté (CCS/U). Cela entraînera une transition vers de nouveaux produits, modèles économiques et modes de consommation dans l'ensemble des secteurs économiques, et demandera une gestion prudente des conséquences sur l'emploi et les salaires.

Cette reconfiguration du système énergétique mondial engendrera d'importantes externalités positives. La transition vers la neutralité des émissions va stimuler l'innovation et la croissance économique, et créer de nouveaux emplois. Elle va améliorer le niveau de vie, en particulier dans les économies en développement, grâce à la réduction de la pollution locale de l'air et son impact sur la santé, à la réduction des coûts de l'énergie pour les ménages du fait de la baisse du coût de l'électricité et à l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments, mais également grâce à la plus grande flexibilité des services de mobilité proposés, et l'amélioration de la qualité et de la durabilité des produits de consommation.

La publication de ce rapport intervient dans une situation sans précédent en raison de la pandémie COVID-19, qui a mis le monde à l'arrêt, provoquant une chute brutale du PIB et du commerce international et démontrant combien l'économie mondiale était peu préparée à des risques systémiques, malgré les mises en garde de certains scientifiques. Bien que la première priorité soit de protéger les populations et de renforcer en urgence les systèmes de santé, cette crise requiert également une réponse de reprise économique, centrée sur le développement d'une économie plus résiliente. Dans ce contexte, ce rapport fournit aux dirigeants des gouvernements et du secteur privé une perspective de **création d'une économie de l'avenir, plus saine, plus résiliente et neutre en carbone**. L'ETC a déjà publié deux rapports précisant les actions spécifiques que les gouvernements peuvent mettre en œuvre pour sortir de la crise actuelle de façon durable.⁴ De fait, l'ETC est convaincue que le monde développé doit atteindre la neutralité des émissions GES d'ici à 2050, et le reste du monde en 2060 au plus tard. **Ce rapport explique pourquoi nous croyons que cette transition est réalisable, les moyens à mettre en œuvre et les étapes à suivre pendant cette décennie pour mettre le monde sur la bonne trajectoire**, intégrant les résultats de nos précédentes publications et mettant à jour les analyses, afin de prendre en compte les dernières tendances de l'état et des coûts des technologies essentielles. Il décrit :



1. Energy Transitions Commission (2017), *Greater Energy – Better Prosperity*

2. Energy Transitions Commission (2018), *Mission Possible*

3. Energy Transitions Commission and Rocky Mountain Institute (2019), *China 2050: A Fully Developed Rich Zero-Carbon Economy* and Spencer, T. and Awasthy, A. (2019), TERI, *Analysing and Projecting Indian Electricity Demand to 2030*. Pachouri, R., Spencer, T., and Renjith, G., TERI (2019), *Exploring Electricity Supply-Mix Scenarios to 2030*, and Udetanshi, Pierpont, B., Khurana, S. and Nelson, D., TERI (2019), *Developing a roadmap to a flexible, low-carbon Indian electricity system: interim findings*

4. ETC and Rocky Mountain Institute (2020), *Achieving a Green Recovery for China: Putting Zero-Carbon Electrification at the Core*; and ETC (2020), *7 Priorities to Help The Global Economy Recover*.

Atteindre la neutralité carbone est techniquement et économiquement faisable

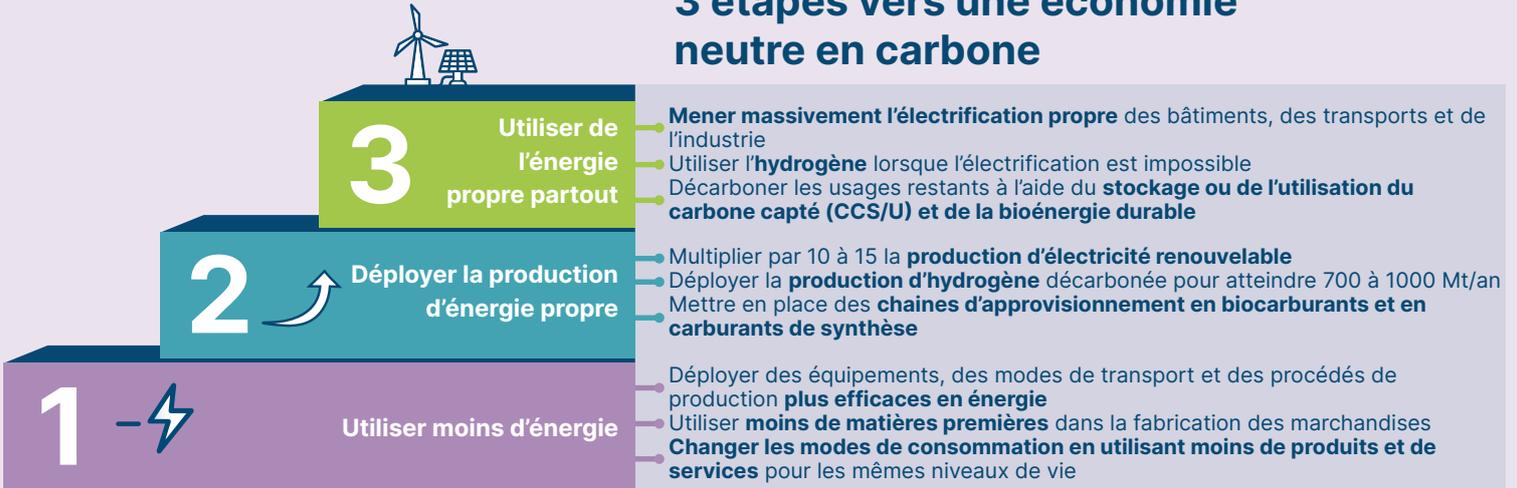


Les technologies nécessaires pour décarboner chaque secteur sans compensation carbone existent ou sont en développement

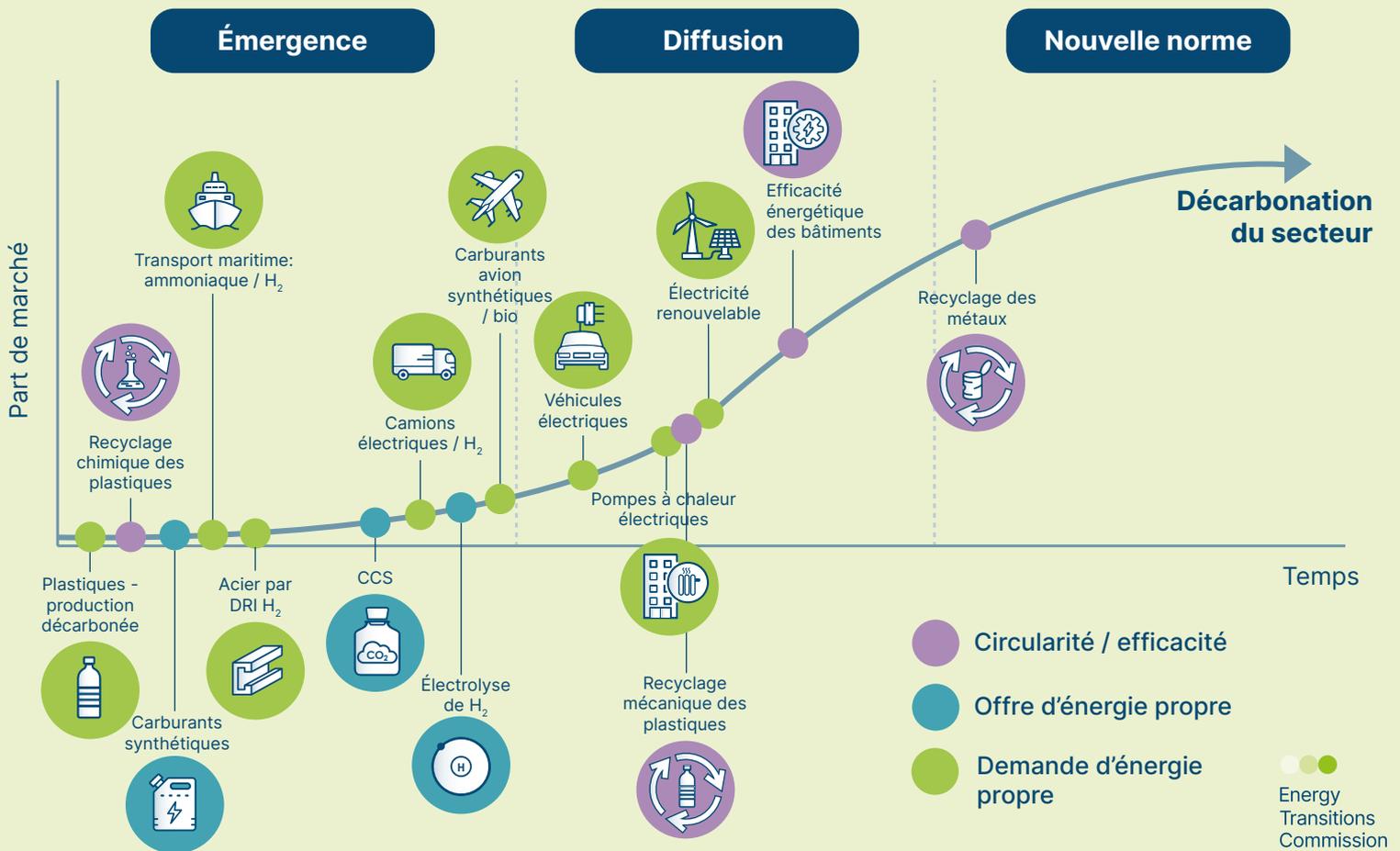


La décarbonation totale coûtera moins de 0,5 % du PIB mondial.

3 étapes vers une économie neutre en carbone



Le déploiement des technologies zéro-émissions





I. Il est possible de décarboner l'économie d'ici le milieu du siècle : une mise en œuvre en trois étapes

Il est techniquement possible de décarboner l'économie d'ici le milieu du siècle, à un coût inférieur à 0,5 % du PIB mondial, et ce en trois étapes :

1

Utiliser moins d'énergie :

par des améliorations spectaculaires de la productivité énergétique.

2

Développer l'approvisionnement en énergie propre :

par la construction massive de capacités de production d'électricité propre et peu coûteuse, et de sources d'énergie zéro-carbone.

3

Utiliser de l'énergie propre partout :

par la décarbonation de l'usage de l'énergie dans tous les secteurs, en substituant des technologies et procédés employant de l'énergie propre aux combustibles fossiles difficiles à décarboner (électricité propre, hydrogène zéro-carbone, bioénergie durable, carburants de synthèse obtenus à partir de l'électricité, et capture du carbone).

Utiliser moins d'énergie

Il existe des opportunités considérables d'améliorer la transformation de l'énergie en production de biens et de services de consommation, et de réduire ainsi l'énergie utilisée tout en maintenant la qualité de vie, voire en l'améliorant. Ces opportunités se trouvent dans trois domaines [Figure A] :

- **L'efficacité énergétique** : Il existe de multiples applications techniques dans lesquelles l'efficacité énergétique peut encore être améliorée, comme dans les transports (avions plus efficaces), l'industrie (réduction des apports énergétiques dans la production traditionnelle d'acier en hauts-fourneaux) et les bâtiments (meilleure isolation et coefficient de performance supérieur des systèmes de climatisation). Des améliorations allant jusqu'à 50 % sont théoriquement possibles dans le secteur des transports. Dans l'industrie, elles sont plus modestes mais néanmoins significatives, de l'ordre de 10 à 20 %.
- **L'efficacité des matériaux** : Il existe des possibilités importantes de réduire la production primaire de matériaux très intensifs en énergie, comme l'acier et le ciment, en repensant la conception des produits, en utilisant des matériaux moins intensifs en énergie et en améliorant leur recyclage et leur réutilisation. En théorie, de telles mesures pourraient réduire les émissions globales des secteurs de l'industrie lourde de 40 % en dessous du niveau des scénarios de statu quo.
- **L'efficacité des services** : Finalement, il est possible d'assurer de meilleurs niveaux de vie en utilisant des biens et services moins intensifs en énergie, par exemple par un meilleur aménagement urbain ou encore par la mise en place de systèmes de partage des moyens de transport. Dans ces cas, le potentiel de réduction des émissions dépend des changements de comportement des consommateurs et est donc plus aléatoire, mais, en principe, d'importantes réductions peuvent être obtenues.

Saisir ces opportunités nécessite des changements profonds des chaînes de valeur (par exemple, au stade de la conception de produits, de la distribution et du recyclage), ainsi que des choix de consommation et de modes de vie (en ce qui concerne par exemple l'aménagement urbain et les systèmes de mobilité).

La quantité totale d'énergie finale nécessaire pour entretenir des niveaux de vie élevés va également être fortement impactée par le degré d'électrification des activités économiques au sein de chaque secteur. Cela est dû à l'avantage inhérent de l'électricité en termes d'efficacité énergétique dans de nombreux usages, en particulier le transport routier et le chauffage des bâtiments.

Enfin, les technologies numériques peuvent potentiellement contribuer de façon significative à ces opportunités en améliorant l'efficacité tant de l'usage final que du système total. Elles peuvent amener des réductions de l'énergie utilisée dans de nombreux secteurs, de la construction à la production de biens (l'impression 3D par exemple, ou l'allègement des véhicules). Ces technologies améliorent la surveillance des pertes d'énergie et la réponse automatisée qu'on peut leur apporter, et ce dans tous les secteurs (contrôle industriel de l'efficacité énergétique, gestion des volumes et chargements en logistique). Elles permettent un contrôle et une gestion avancés de la demande d'énergie, au niveau des systèmes électriques (pour les véhicules électriques intelligents, ou encore le chauffage de bâtiments).

Pris dans son ensemble, le potentiel de réduction des besoins énergétiques et donc des coûts de la transition énergétique, est significatif : **la baisse de la demande d'énergie entre aujourd'hui et le milieu du siècle peut atteindre 15 %**, sans affecter les améliorations de niveau de vie dans les économies en développement. Si toutes les opportunités d'amélioration de la productivité énergétique existant théoriquement étaient exploitées, les investissements nécessaires pour déployer massivement l'approvisionnement en énergie propre pourraient être fortement réduits. Par exemple, les investissements nécessaires dans le domaine de l'électricité propre pourraient être réduits de 25 %, par rapport à un scénario d'amélioration limitée de la productivité énergétique.

Les trois dimensions de la productivité énergétique



Figure A

SOURCE : Analyse de SYSTEMIQ pour l'Energy Transitions Commission (2019), sur la base de Material Economics (2018), *The Circular Economy: a Powerful Force for Climate Change*

Développer l'approvisionnement en énergie propre



La décarbonation requiert une transition majeure des combustibles fossiles intensifs en carbone vers une énergie propre. **L'électrification directe est la voie principale vers la décarbonation** et, parce qu'elle constitue la solution la moins coûteuse et la plus efficace en énergie dans la plupart des applications, **le déploiement de l'approvisionnement en électricité zéro-carbone est la priorité la plus importante.**

Toutefois, dans certains cas, ce n'est pas encore faisable et, dans d'autres, ce n'est pas rentable.

C'est pourquoi **trois technologies supplémentaires** sont nécessaires pour décarboner complètement tous les secteurs économiques :



L'hydrogène est une source d'énergie dont la densité en énergie et la capacité à être stocké et utilisé à haute température la rend préférable à l'électricité dans certaines applications. L'hydrogène peut être produit par électrolyse avec peu ou pas d'émissions de carbone, et est alors appelé « hydrogène vert ». Il peut également être obtenu par reformage du méthane à la vapeur avec stockage ou utilisation du CO₂ capté (CCS), ou « hydrogène bleu ». L'hydrogène peut être employé à la production de carburants à base d'hydrogène (par exemple l'ammoniaque et des carburants de synthèse).



La capture et le stockage du carbone, ou CCS (Carbon Capture and Storage) est un procédé qui, outre son application possible à la fabrication d'hydrogène bleu, peut s'employer dans de multiples procédés industriels et dans les centrales thermiques, qui continuent à fournir de l'électricité aux systèmes électriques principalement renouvelables, de façon flexible. Sa rentabilité dépend de la disponibilité locale de capacités de stockage adaptées et sûres.



La biomasse est une ressource qui, en principe, peut convenir à des applications très diverses, notamment à la production de chaleur industrielle, de produits chimiques et de carburants pour les transports, ainsi qu'à l'offre flexible d'électricité thermique. Mais le déploiement de son utilisation à l'ensemble des secteurs doit prendre en compte les limites de l'offre de biomasse réellement durable.⁵

Il est impossible de prévoir précisément ce que sera le mix énergétique mondial dans une économie zéro émission carbone. Mais tous les scénarios réalistes visant une décarbonation complète impliquent **un déploiement massif de l'usage direct de l'électricité** (atteignant 65 à 70 % de la demande d'énergie finale, contre 19 % aujourd'hui), et **un déploiement très important de l'hydrogène** (comptant pour 15 à 20 % de la demande d'énergie finale, avec une part croissante de l'électrolyse pour sa production).

5. Dans le présent rapport, le terme « biomasse durable » décrit la biomasse produite sans déclencher de modification destructrice de la gestion forestière et de la gestion des sols (en particulier la déforestation), cultivée et récoltée selon des principes écologiques (notamment la biodiversité et le bon état des sols), et dont l'empreinte carbone sur le cycle de vie est d'au moins 50 % inférieure à celle de tout autre carburant fossile (en considérant tant le coût d'opportunité du sol que les périodes de séquestration et de libération du carbone, propres à chaque type de matière première biologique et d'usage)

En conséquence, l'offre globale annuelle d'électricité doit être multipliée par quatre ou cinq pour atteindre environ 90 à 115 000 terawatt-heures (TWh) [Figure B], toute sa production devant être complètement décarbonée. Pour y arriver, il faut accélérer fortement les investissements en électricité renouvelable : au cours des trente prochaines années, le rythme annuel moyen des augmentations de capacités éoliennes et solaires doit être cinq à six fois celui atteint en 2019.

Ce déploiement massif d'électricité zéro-carbone sera rentable : dans beaucoup de pays, **les coûts de l'électricité renouvelable sont déjà inférieurs aux coûts totaux de l'électricité issue de nouvelles centrales à charbon ou à gaz et, dans certains cas, inférieurs au coût marginal de l'électricité issue des centrales thermiques existantes**. De plus, comme les coûts des renouvelables continuent à baisser, leur avantage en termes de coûts croît de façon significative.

La question cruciale n'est donc plus le coût de production de l'électricité renouvelable, mais bien le coût d'ajustement de l'offre et de la demande de systèmes à très hauts niveaux de variabilité de l'offre d'électricité renouvelable. Mais, là aussi, la technologie et les tendances des coûts rendent les solutions de plus en plus viables :

- La flexibilité journalière peut être assurée par des batteries, dont le coût a chuté ces dernières années et les prévisions sont de 100 US\$ par kilowatt-heure (kWh) pour 2023. Mais la gestion de la demande, en particulier par la programmation optimale de la charge des véhicules électriques, peut constituer une solution encore moins coûteuse.
- Le problème crucial concerne les moyens d'ajustement hebdomadaire ou saisonnier dans les pays soumis à des variations saisonnières marquées de l'offre ou de la demande. Mais, là aussi, il existe toute une gamme de solutions possibles, notamment le stockage saisonnier d'énergie utilisant l'hydrogène, l'électricité hydraulique dispatchable, le fait de continuer à utiliser les centrales thermiques (fonctionnant pendant quelques heures dans l'année et décarbonées par CCS/U pour les centrales à gaz ou par l'usage de biomasse durable), ou encore le transfert de la demande des ménages et de l'industrie tant géographiquement que dans le temps.

La production électrique brute devra atteindre environ 90 000 à 115 000 TWh/an d'ici 2050 dans une économie zéro-carbone

Production électrique totale d'ici 2050 dans les scénarios indicatifs de l'ETC
En milliers de TWh/an

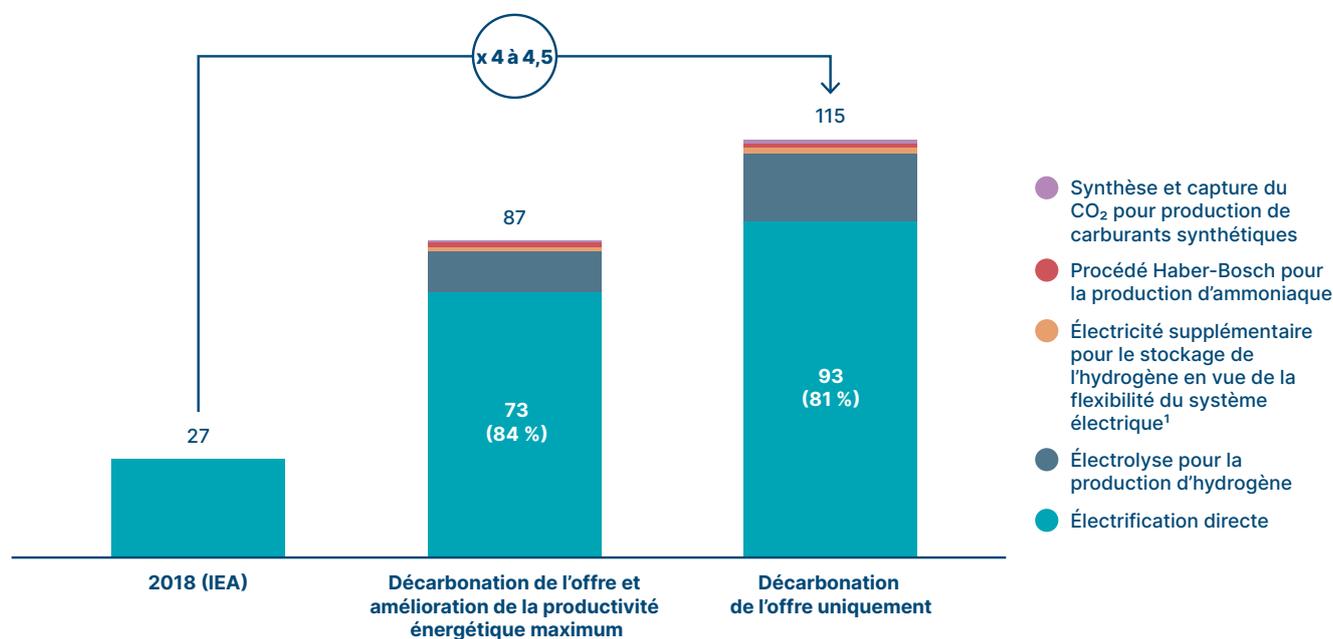


Figure B

¹Électricité supplémentaire nécessaire au stockage de l'hydrogène pour assurer la flexibilité du système électrique, couvrant uniquement les pertes dues à la transformation en hydrogène puis en électricité à nouveau.

SOURCE : Analyse de SYSTEMIQ pour l'Energy Transitions Commission (2020), IEA (2019), *World Energy Outlook*

Ainsi, notre analyse actualisée montre qu'au milieu des années 2030 au plus tard, il sera possible de disposer de systèmes électriques pour lesquels la part des renouvelables pourrait atteindre 85%, **à un coût global** (couvrant toutes les ressources nécessaires au back-up, au stockage et à la flexibilité) **qui sera hautement compétitif** par rapport à celui de systèmes à combustibles fossiles dans beaucoup d'endroits, et nettement moins coûteux dans d'autres [Figure C].

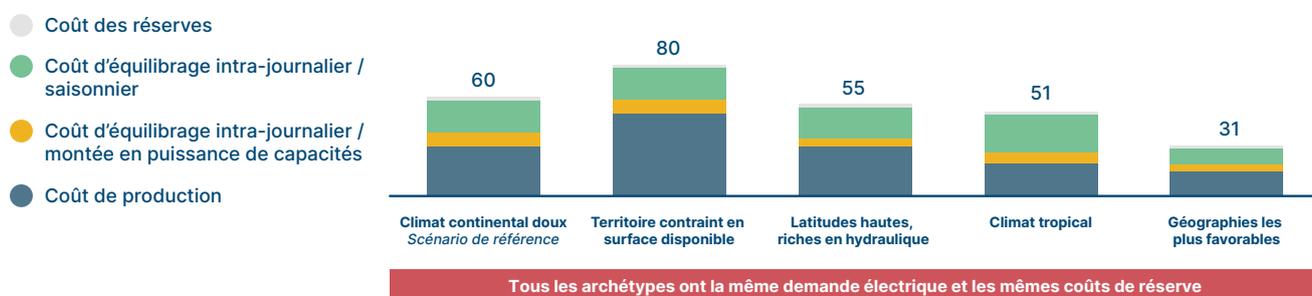
Toutefois, en parallèle à l'électricité zéro-carbone, il est également important de développer les trois autres technologies à bien plus grande échelle. Mettre en œuvre une économie décarbonée d'ici le milieu du siècle va exiger une accélération spectaculaire des investissements.

- **La production totale annuelle d'hydrogène doit passer de 60 millions de tonnes (Mt) aujourd'hui à 500 - 800 Mt** au milieu du siècle pour satisfaire la demande finale d'hydrogène, d'ammoniaque et de carburants de synthèse.
- Il faut environ **6 à 9,5 Gt de CO₂ par an de CCS/U** pour décarboner pratiquement totalement les autres usages de combustibles fossiles, en particulier dans l'industrie lourde (~ 40 % du total), et pour la production d'hydrogène à partir du méthane (~ 30 % du total) et la production d'électricité en périodes de pointe (~ 20 % of total).
- **46 à 69 exajoules** de matières premières biologiques sont également nécessaires, et toute cette énergie doit être fournie avec une empreinte carbone réduite, de façon durable et de préférence à partir de biomasse résiduelle.

En général, il ne fait aucun doute que le monde dispose de suffisamment de ressources naturelles pour permettre cette transition vers une économie décarbonée. Il existe suffisamment de terres, de ressources minérales et aquatiques pour soutenir la croissance massive requise pour la production d'électricité et d'hydrogène verts. La capacité de stockage du carbone est sans doute également disponible au niveau mondial, mais à des niveaux différents selon les régions. **La plus grande incertitude réside dans la quantité de ressources biologiques à faible émission de carbone et véritablement durables.** Si l'usage des ressources biologiques est limité, le recours à l'électricité, à l'hydrogène et au CCS sera mécaniquement accru. Il faut donc donner la priorité à l'usage de la biomasse durable pour des applications pour lesquelles le moins de technologies alternatives sont disponibles.

Le coût local de l'électricité quasi décarbonée variera en fonction des caractéristiques climatiques, des ressources naturelles et des infrastructures électriques existantes

Coût total maximum de la production d'électricité dans un système électrique presque complètement renouvelable d'ici 2035
En US\$/MWh, décomposé par service de flexibilité



	Climat continental doux Scénario de référence	Territoire contraint en surface disponible	Latitudes hautes, riches en hydraulique	Climat tropical	Géographies les plus favorables
Besoins saisonniers	Pic hivernal élevé Long hiver	Identique au scénario de référence	- 5 % par rapport à la référence Capacité de production partiellement couverte par l'hydraulique existant	- 25 % par rapport à la référence Saisonnalité limitée (basses latitudes)	- 50 % par rapport à la référence Saisonnalité limitée (basses latitudes)
Besoins journaliers	Moyen : besoins en chauffage mais éolien et solaire complémentaires	Identique au scénario de référence	- 41 % par rapport à la référence 80 % couverts par l'hydraulique existant à bas coût	+ 20 % par rapport à la référence Longues périodes sans vent ni soleil + beaucoup de climatisation	- 50 % par rapport à la référence Bas : soirées douces
Production d'énergie renouvelable de base	Éolien et solaire complémentaires	+ 67 % par rapport à la référence Défi de disponibilité de l'espace	Identique au scénario de référence	- 33 % par rapport à la référence Éolien et solaire abondants	- 50 % par rapport à la référence Éolien et solaire abondants

SOURCE : À partir de l'analyse de Climate Policy Initiative pour l'Energy Transitions Commission (2017), *Low-cost, low-carbon power systems*

Utiliser de l'énergie propre partout

Les quatre formes d'énergie propre décrites précédemment rendent possible techniquement de décarboner complètement d'ici le milieu du siècle tous les secteurs de l'économie, sauf peut-être l'agriculture. Dans de nombreux secteurs, l'électrification directe dominera, en raison de son inhérente efficacité. Dans d'autres et en particulier dans l'industrie et les bâtiments, il existe un portefeuille de solutions, et la voie de décarbonation choisie variera régionalement en fonction de la disponibilité locale des ressources et des coûts :



Les secteurs déjà électrifiés - comme ceux des appareils ménagers, de l'éclairage, de la climatisation, du chauffage de l'eau, des ordinateurs, des machines industrielles et ferroviaires - doivent simplement s'assurer que l'électricité utilisée est décarbonée.



Le transport de surface sera probablement entièrement électrique, avec des véhicules à batteries ou à pile à combustible à hydrogène, bien avant 2050 et bien plus rapidement que ne le prévoient de nombreuses projections, du fait de l'inhérente efficacité énergétique des moteurs électriques. Pour les véhicules légers, les coûts en capital initial de l'achat de véhicules électriques (VE) chuteront probablement en dessous de ceux des véhicules à combustion interne (VCI) d'ici le milieu des années 2020. Pour les véhicules de poids moyen et lourd, la décarbonation va probablement passer par une électrification au moyen de batteries ou par l'usage de l'hydrogène dans des VE à pile à combustible, la première solution dominant pour les trajets intra-urbains de courte distance et la seconde pour les trajets de plus longue distance.



Dans les secteurs des transports maritimes et aériens, l'électrification à l'aide de batteries et l'hydrogène va également jouer un rôle important pour les trajets de courte distance. Mais, dans le futur proche, il peut être nécessaire d'utiliser des carburants liquides en raison de la densité énergétique limitée des batteries et la faible densité volumétrique de l'hydrogène. Ces carburants liquides proviendront soit de ressources biologiques durables et à faibles empreinte carbone (alcools et biocarburants, par exemple), soit seront produits par synthèse (ammoniaque dans le cas des transports maritimes, et carburants de synthèse dans celui des transports aériens).



Dans les secteurs de l'industrie lourde - acier, ciment, produits chimiques et aluminium - une combinaison de sources d'énergie propre et de capture du carbone peut éliminer à la fois les émissions due à l'énergie et celles produites par les procédés chimiques eux-mêmes. L'option la plus compétitive au niveau des coûts variera probablement selon la région considérée, selon qu'il s'agit de modifications de sites existants ou de création de nouveaux sites.

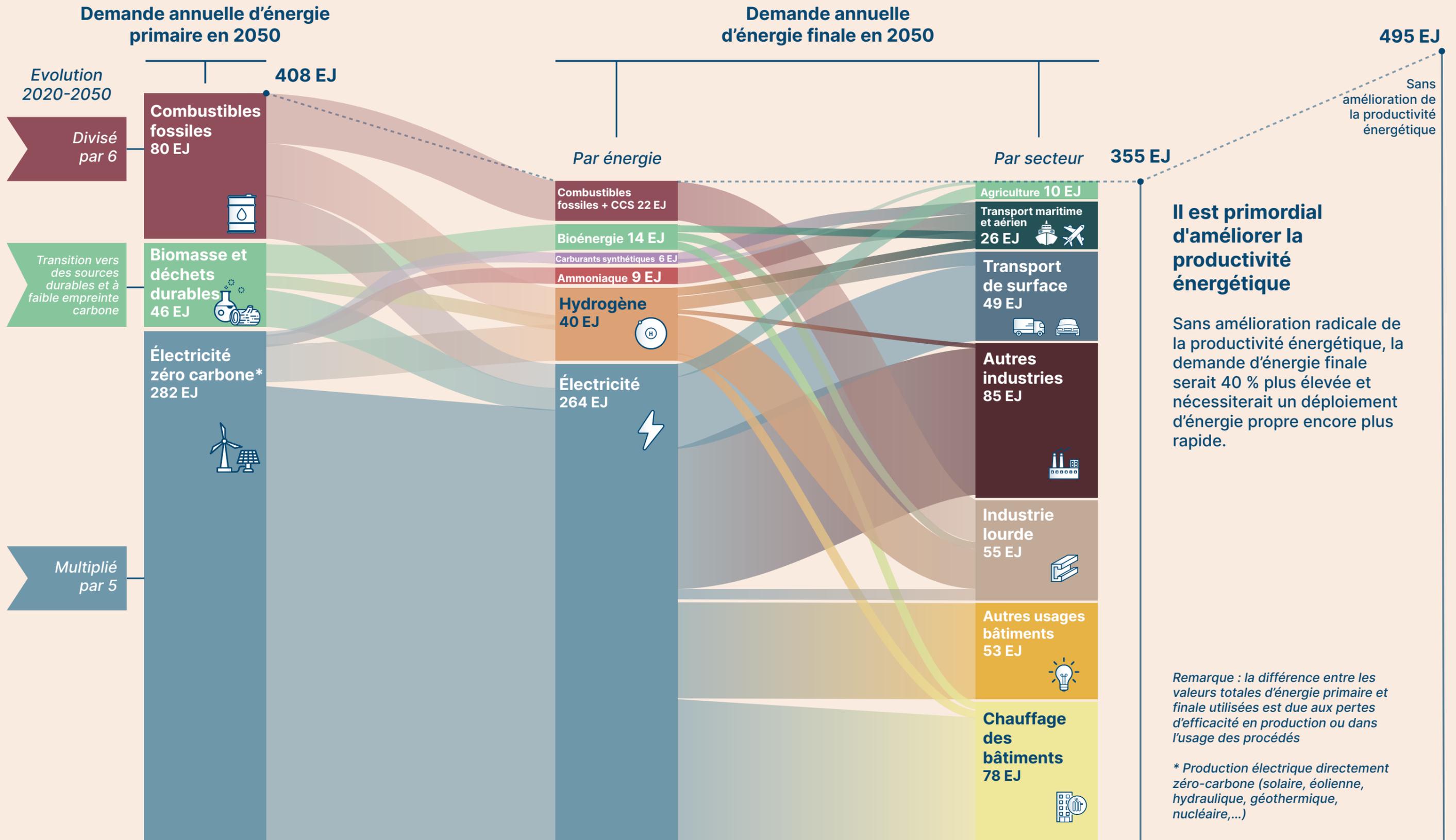


Le chauffage des bâtiments résidentiels et commerciaux est déjà électrifié dans de nombreuses régions et l'électrification de ce secteur peut continuer en employant des pompes à chaleur ou un chauffage électrique résistif. La combustion de l'hydrogène ou du biométhane, utilisant les réseaux de gaz et les systèmes de chauffage urbains existants, compte parmi les solutions alternatives. La solution optimale varie selon la région, en fonction des ressources disponibles et des infrastructures existantes. L'amélioration de l'isolation des bâtiments est particulièrement importante pour la réduction de la demande de pointe et pour rendre la décarbonation plus gérable du point de vue du système énergétique, en particulier lorsque le choix se porte sur des solutions électriques.



En agriculture, les émissions dues à l'usage de carburants fossiles peuvent être éliminées grâce à l'électrification propre ou l'utilisation d'e-carburants. Cependant, il va être plus difficile d'éliminer les émissions de protoxyde d'azote et de méthane produites par les processus agricoles. Quelques technologies peuvent aider à réduire ces émissions, en particulier les changements dans les pratiques agricoles, mais des modifications majeures de l'alimentation seront probablement aussi nécessaires.

Une transformation complète de notre système énergétique est nécessaire pour soutenir une économie zéro-émissions



Conséquences pour l'usage des carburants fossiles

Ces changements vont faire décliner la demande de carburants fossiles de façon spectaculaire [Figure D] :



L'usage thermique du charbon sera pratiquement abandonné, à l'exception du charbon à coke associé au CCS dans la production d'acier, et de son rôle éventuel dans la production de matières premières chimiques.



La demande de pétrole pourrait baisser de 100 millions de barils par jour en 2019 à environ 10 millions de barils par jour vers le milieu du siècle, le pétrole jouant encore un rôle de matière première dans la production de plastiques.

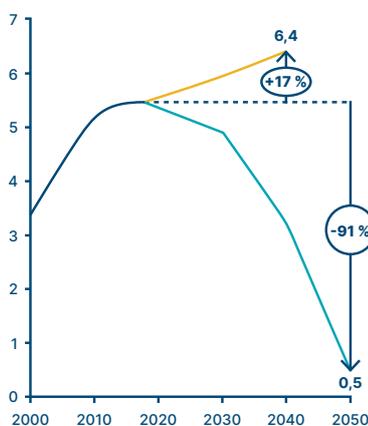


Le gaz naturel jouera un rôle de transition dans de nombreux secteurs et de nombreux endroits. Cependant, la demande peut tout de même baisser d'environ 30 % à 57 % d'ici le milieu du siècle. L'utilisation transitoire optimale du gaz naturel doit prendre en compte l'impact important des fuites de méthane dans la chaîne d'approvisionnement et la nécessité vitale de trouver une voie de décarbonation, soit par une modernisation du CCS/U, soit par le passage à un autre « gaz vert », comme le biométhane ou l'hydrogène.

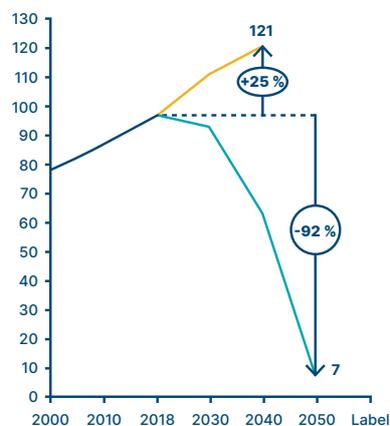
Conséquences de la décarbonation pour la demande de combustibles fossiles

— Scénario ETC – décarbonation de l'offre seulement — Scénario Politiques Actuelles de l'IEA

Consommation de charbon
Milliards de tonnes par an



Consommation de pétrole
Millions de barils par jour



Consommation de gaz naturel
Milliards de milliards de m³ par an

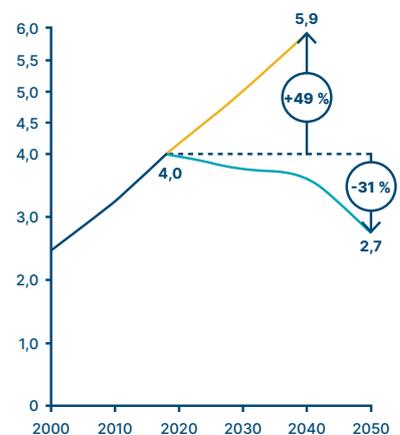


Figure D

REMARQUE : Les valeurs utilisées dans les scénarios de l'ETC pour 2030 et 2040 sont celles utilisées dans le scénario central de l'article de Copenhagen Economics (référence ci-dessous)

SOURCE : Analyse de SYSTEMIQ pour l'Energy Transitions Commission (2020), IEA (2019), *World Energy Outlook*, Copenhagen Economics (2017), *The future of fossil fuels: How to steer fossil fuel use in a transition to a low-carbon energy system*

Conséquences pour l'usage de compensations carbone et de solutions basées sur la nature

De nombreux modèles décrivant la voie vers la décarbonation font intervenir des « compensations carbone ». Ces compensations proviennent principalement de trois sources : des crédits carbone provenant d'autres secteurs émetteurs de carbone, des technologies d'émissions négatives (bioénergie combinée au CCS, ou capture directe du CO₂ dans l'air combinée au CCS), et des modifications de l'utilisation des sols qui entraîneraient des réductions d'émissions (reforestation par exemple).

Cependant, la **disponibilité** de ces compensations carbone va probablement diminuer sur le long terme.

- **Le potentiel des crédits carbone provenant d'autres secteurs va naturellement décroître** avec l'accélération de la décarbonation de l'économie.
- **Les solutions basées sur la nature ne peuvent fournir un flux permanent d'émissions négatives**, tous les écosystèmes naturels tendant in fine à un équilibre des émissions et de l'absorption qui est neutre en carbone, après la période de croissance (30 à 40 ans pour la reforestation). De plus, selon la forme que prend la séquestration du carbone, celle-ci peut être sensible aux événements climatiques et naturels.

Dans ce contexte, la position de l'ETC est la suivante :

- Tous les secteurs de l'économie (sauf l'agriculture) peuvent et doivent atteindre une « véritable neutralité carbone nette » d'ici le milieu du siècle, en attribuant un rôle au CCS/U, mais **aucun rôle majeur ni permanent à l'achat de crédits carbone à d'autres secteurs, ni aux compensations provenant de solutions basées sur la nature.**
- **Ces solutions basées sur la nature peuvent servir ponctuellement à accroître le stock de carbone** contenu dans l'écosystème terrestre (et à réduire d'autant les concentrations atmosphériques en GES), et l'achat de compensations carbone peut jouer un rôle positif dans le financement de cet effort, dans les premières étapes de la transition, dans la mesure où :
 - elles **s'ajoutent** à la progression la plus rapide possible vers la décarbonation totale du secteur plutôt qu'elles ne la remplacent.
 - leur valeur présumée de réduction de carbone prend en compte le fait que **le temps importe dans l'effort de réduction des émissions de CO₂**. Dans le contexte où des émissions importantes peuvent faire dépasser des seuils dangereux pour le climat, une tonne de dioxyde de carbone (CO₂) absorbée en plusieurs années par la croissance d'une forêt n'a pas la même valeur qu'une tonne de CO₂ évitée par des actions sectorielles.
 - Des systèmes robustes de certification de la qualité des solutions basées sur la nature sont adoptés.
- **La place des solutions basées sur la nature et d'autres technologies d'élimination du carbone**, comme la capture directe du CO₂ dans l'air avec CCS, ou la bioénergie avec CCS, **existera mais restera relativement faible** pendant plusieurs années après 2050. Ce sera nécessaire pour éliminer **2 à 4 Gt de CO₂ par an d'émissions résiduelles**, provenant du secteur agricole (1 à 2 Gt) et des secteurs de l'énergie et de l'industrie (1 à 3 Gt, dues au fait que les procédés de CCS ne réussissent pas à capter 100 % du CO₂).

II. Les coûts, les investissements et les défis associés à la transition vers la neutralité carbone

Une fois mise en place une économie zéro-carbone, la réduction des niveaux de vie en 2050, mesurés de façon conventionnelle, tant dans les pays développés que ceux en développement, sera insignifiante (moins de 0,5 %), et l'impact sur les conditions de vie sera extrêmement positif, si l'on prend en compte les effets négatifs évités d'un changement climatique non contrôlé. Les coûts d'investissement dans la transition vers une économie décarbonée pourraient atteindre 1,0 à 1,5 % du PIB annuel, ce qui constitue un montant tout à fait abordable, surtout en cette période prolongée de faibles taux d'intérêt.

Coûts sectoriels de décarbonation par tonne de CO₂ évitée

Les coûts sectoriels par tonne de CO₂ évitée vont varier selon les régions et évolueront dans le temps en raison de l'incertitude inhérente à l'évolution des coûts et des technologies:



Dans le **secteur de la production électrique, le coût de la décarbonation des secteurs déjà électrifiés** (comme les appareils et la climatisation des bâtiments) **et des secteurs prêts à être électrifiés** (comme les véhicules légers) sera faible ou nul, voire négatif. Ce coût reflète celui de l'électricité renouvelable, déjà faible et qui ne cesse de baisser, et l'efficacité inhérente aux procédés électrifiés.



Dans le **transport longue distance** (maritime et aérien), le passage à des carburants de synthèse de substitution implique des coûts de décarbonation sur le long terme importants en comparaison avec ceux de solutions alternatives à base de carburants fossiles (100 à 300 US\$ par tonne de CO₂).



Dans les **secteurs de l'industrie lourde**, les coûts sont modérés à élevés, selon le procédé et le carburant alternatifs requis (pouvant aller de 25 à plus de 200 US\$ par tonne de CO₂). Le ciment et les plastiques sont les matériaux les plus coûteux à décarboner. Cependant, la réduction de la demande de matières premières par le recyclage, l'efficacité des matériaux et l'utilisation de matériaux zéro-émissions alternatifs peuvent considérablement réduire les coûts.



Pour le **chauffage des bâtiments**, les coûts de décarbonation varient fortement selon les régions et le type de bâtiment, ainsi que la technologie utilisée pour leur décarbonation.



Dans le **secteur agricole**, le coût de la décarbonation de l'énergie directe et indirecte devrait être relativement faible, mais l'utilisation de pratiques agricoles réduisant les émissions de méthane et de nitrates peut imposer des surcoûts.



Impact sur les niveaux de vie et la croissance économique

Il est possible d'estimer l'impact sur les niveaux de vie en 2050, mesurés de façon conventionnelle, en comparant les coûts supplémentaires requis par une économie zéro-carbone pendant une année donnée à ceux d'une économie à fortes émissions de carbone. L'ETC estime que [Figure E] :

- Dans un scénario de coût élevé de la décarbonation et d'amélioration limitée de la productivité énergétique, les coûts supplémentaires pourraient s'élever à **0,49 % du PIB mondial projeté (1600 milliards de US\$)**.
- Dans un scénario de coût faible de la décarbonation et d'amélioration maximale de la productivité énergétique, les coûts supplémentaires pourraient ne s'élever qu'à 0,17 % du PIB mondial projeté (600 milliards de US\$).
- Dans les deux scénarios, **les coûts sont dominés par trois secteurs particuliers** : le ciment (et donc les coûts de la construction), le transport aérien et le transport maritime. Le coût de la décarbonation du chauffage des bâtiments peut également être important dans certains pays, mais reste faible en pourcentage du PIB mondial. De nombreux secteurs de l'économie peuvent être décarbonés à des coûts très faibles ou nuls, voire négatifs.

Ces coûts contrastent nettement avec les conséquences négatives d'une absence de contrôle du changement climatique. Une étude récente estime que, depuis l'année 2000, le réchauffement a déjà coûté à l'Europe et aux États-Unis au moins 4000 milliards d'US\$ de pertes, et que la pauvreté dans les pays tropicaux a augmenté de 5 % par rapport à un monde sans réchauffement climatique. De plus, passer à une économie zéro-carbone améliorera de façon spectaculaire la qualité de l'air, sauvant des vies et améliorant la santé. Des estimations suggèrent que la mauvaise qualité de l'air est la cause de 4,2 millions de morts prématurées et prévisibles par an dans le monde.⁶

Le faible impact sur les niveaux de vie reflète le fait que, **dans de nombreux secteurs, l'impact de la décarbonation sur les prix à la consommation est insignifiant** [Figure F]. Ainsi, dans l'industrie lourde, même si la décarbonation se traduit par une augmentation forte du coût de la tonne d'acier, les augmentations des prix à la consommation devraient rester inférieures à 1 %. De la même façon, même si la décarbonation du transport maritime exige d'augmenter fortement ses coûts, l'impact sur les marchandises importées reste minimal.

Toutefois, dans certains secteurs, les impacts sur les coûts pour le consommateur final sont significatifs, et dans quelques cas, il est important d'envisager **les conséquences en termes de répartition**. Le coût de décarbonation du chauffage résidentiel pourrait lourdement peser en particulier sur les ménages les plus modestes, logés dans des bâtiments mal isolés. En ce qui concerne le transport aérien, les prix à la consommation pourraient également augmenter de façon significative, mais l'effet sur le niveau de vie du consommateur reste minimal, la part du transport aérien dans les dépenses étant faible (de l'ordre de 3 % dans les pays développés). Les effets de répartition sont progressifs plutôt que dégressifs, étant donné que ce sont les groupes de revenus les plus élevés qui voyagent le plus en avion.

De plus, il est important d'anticiper et de gérer certains effets transitoires sur l'emploi. Comme tous les processus de changement technologique, la transition vers une économie décarbonée supprime certains postes de travail et en crée d'autres ailleurs. Globalement, l'effet perturbateur sur l'emploi sera probablement bien moins important que celui qu'ont eu d'autres transformations des économies des pays développés ou en développement, telles que l'automatisation de la production, le passage de la vente traditionnelle à la vente en ligne, et la réorganisation permanente des chaînes d'approvisionnement mondiales en fonction des variations relatives de coûts.

Mais **des effets négatifs sur l'emploi se feront sentir dans trois secteurs**, souvent concentrés géographiquement : le secteur d'extraction du charbon dans certains pays en développement, le secteur de la construction automobile, parce que les VE sont bien plus simples et faciles à fabriquer, et l'élevage de bétail, en raison d'un changement marqué vers l'abandon de la consommation de viande.

Il s'agit donc de mettre en place des **stratégies de transition justes, réfléchies et concertées**, au niveau national et régional, pour compenser ces effets sur l'emploi dans les régions affectées.

6. World Health Organization (2016), *Mortality and Burden of Disease from Ambient Air Pollution*.

Le coût de décarbonation de l'économie sera bien plus faible si les améliorations de la productivité énergétique continuent

Coût total de la décarbonation
Milliards de milliards d'US\$ par an, 2050

X % Part du PIB total projeté, 2050

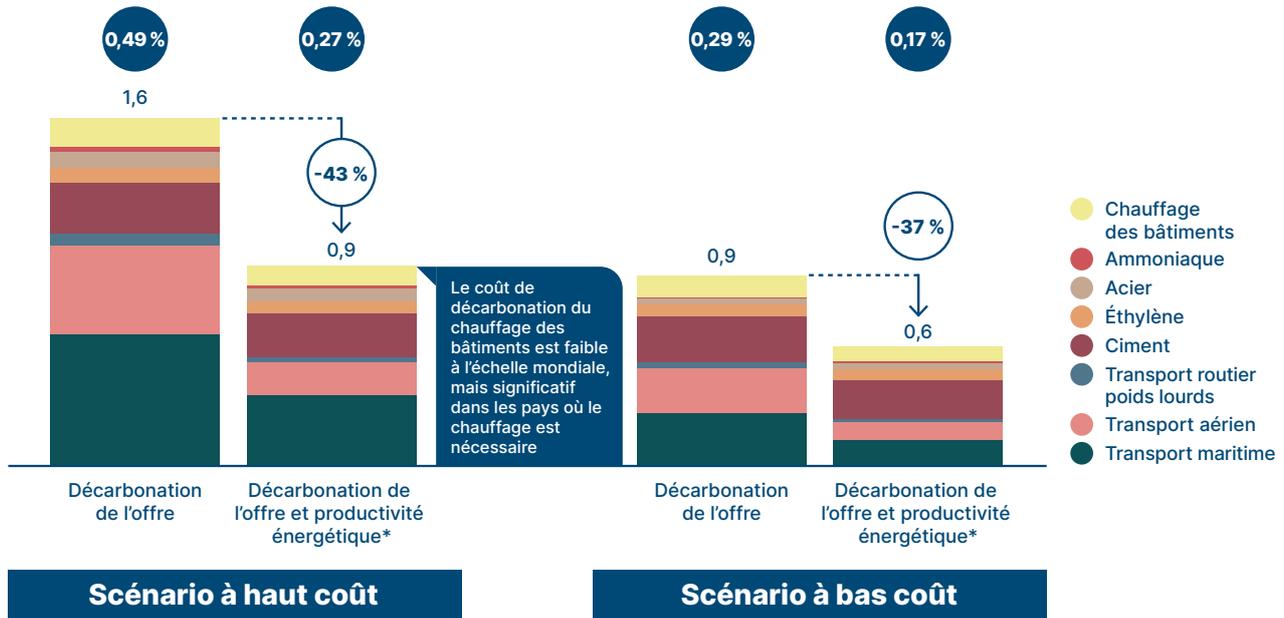


Figure E

REMARQUE : Le terme « productivité énergétique » recouvre l'efficacité énergétique, l'efficacité des matériaux et l'efficacité des services.

SOURCE : Analyse de SYSTEMIQ pour l'Energy Transitions Commission (2020) sur la base de McKinsey & Company (2018), *Decarbonization of industrial sectors: the next frontier*, et de l'analyse de Material Economics pour l'Energy Transitions Commission (2018)

La décarbonation aura un impact important sur le prix des produits intermédiaires, mais négligeable sur les prix des produits finaux dans la plupart des secteurs

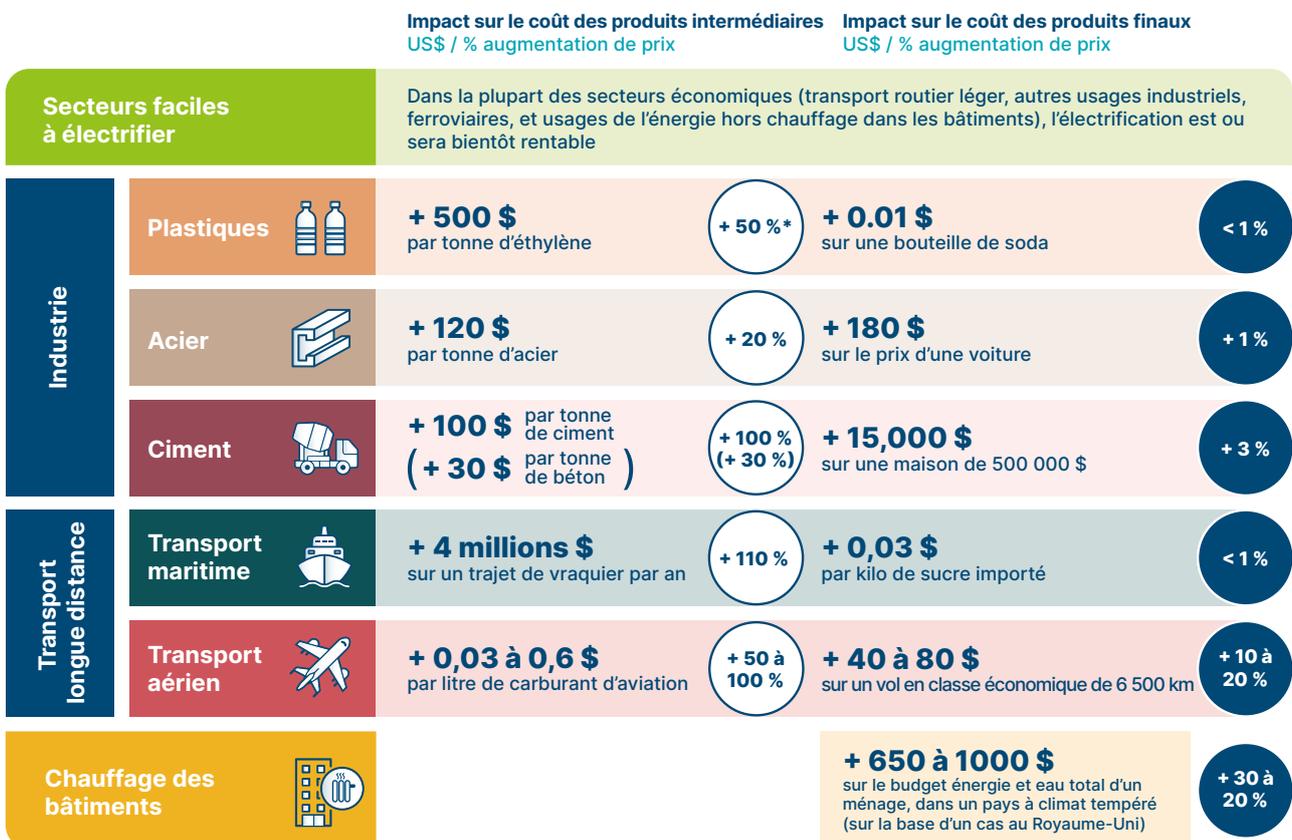


Figure F

*En supposant un prix initial de 1000 US\$/tonne pour l'éthylène, bien que son prix soit très volatile.

SOURCE : SYSTEMIQ pour l'Energy Transitions Commission (2018)

Défis relatifs à la compétitivité dans les secteurs faisant l'objet d'échanges internationaux

Comme le montre la Figure F, même dans certains des secteurs où l'impact sur les prix à la consommation est minimal, les **coûts des produits intermédiaires** peuvent augmenter de façon significative, notamment ceux de la tonne d'acier ou de ciment, ou encore les tarifs du transport maritime de fret. Cela risque de générer un **problème de compétitivité** dans un contexte mondial où prévalent le commerce international, de nombreux gouvernements d'États indépendants et des mécanismes imparfaits de coordination internationale des politiques, l'ensemble étant aggravé par différentes formes d'aide aux activités intensives en carbone dans de nombreux pays.

Dans l'industrie lourde et dans le transport international maritime et aérien, une politique publique optimale exige une coordination internationale. Celle-ci peut être orchestrée par des coalitions de pays qui jouent un rôle majeur dans un secteur donné, plutôt que par des accords au niveau de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (UNFCCC). Là où une telle coordination ne pourrait être mise en place au niveau international, une seconde solution serait de **combinaison des prix domestiques du carbone avec des ajustements fiscaux aux frontières**, afin de faire avancer la transition suffisamment rapidement pour atteindre la décarbonation d'ici le milieu du siècle.

Investissements bruts et nets requis

L'impact sur les conditions de vie de la réalisation d'une économie zéro-carbone en 2050 sera donc extrêmement positif. Mais pour y arriver, il nous faut accepter des **coûts transitoires, engendrés par l'augmentation des investissements annuels** pendant la mise en place de cette nouvelle économie. L'ETC estime que les investissements supplémentaires requis, significatifs en termes monétaires, ne s'élèveront pas à plus d'1 à 1,5 % du PIB mondial (de l'ordre de 1000 à 2000 milliards de US\$ par an), et qu'ils sont faciles à débloquer étant donné les montants actuels d'épargne et d'investissement, surtout dans le contexte macroéconomique à faibles taux d'intérêt observés sur une période prolongée. L'investissement requis est faible si on le compare aux montants énormes des dépenses publiques et des déficits budgétaires consacrés actuellement à relancer l'économie après la crise de la COVID-19 – mesures qui offrent une opportunité, si elles sont bien pensées, d'accélérer la transition énergétique.

La plus grande part des investissements est de loin celle requise pour la mise en place d'un **système électrique mondial** capable de fournir 100 000 TWh par an, comprenant des capacités nouvelles de production d'électricité renouvelable, des réseaux de lignes de transport et de distribution, le stockage en batteries pour garantir la flexibilité diurne et le déploiement de technologies additionnelles afin d'assurer la flexibilité saisonnière et intra-journalière. Cela représente un investissement total annuel supplémentaire d'environ 1000 à 1500 milliards de US\$ par an. La montée en puissance de la production d'hydrogène, de son transport et de son stockage nécessite également des investissements importants, soit dans les équipements d'électrolyse soit dans des équipements de reformage du méthane à la vapeur ou autothermique associé au CCS. L'investissement se situe autour de 3700 milliards de US\$ sur 30 ans, ou 130 milliards de US\$ par an. Des investissements majeurs doivent également être consentis pour lancer la construction à faibles émissions de carbone de **bâtiments urbains**, et la rénovation des stocks des constructions existantes.

III. Les défis et les opportunités liés aux différences régionales

Les différences régionales de dotation en ressources

La dotation en ressources varie de façon importante selon les régions et les pays. Par exemple :

- Le potentiel en électricité renouvelable dépend grandement du climat, de la latitude et de la géographie. Des régions comme l'ouest de la Chine, le Sahara et le Chili sont bien placés pour produire abondamment de l'électricité à bas coût.
- L'offre totale de biomasse durable disponible varie également beaucoup : La Chine a des ressources en biomasse par habitant bien plus limitées que les Amériques. Cependant, la question essentielle est de savoir quelles quantités de ces ressources sont disponibles de façon vraiment durable. La biomasse durable et à faible empreinte carbone, utilisable dans le système énergétique et industriel, a une répartition très différente. Elle est concentrée dans des régions hors de la ceinture tropicale, comportant moins de risque de déforestation.

C'est pourquoi les coûts relatifs des différentes voies de décarbonation vont varier régionalement, de même que la voie optimale de décarbonation pour chacun des secteurs où coexistent plusieurs solutions. Les Contributions Déterminées au niveau National (NDC) et les stratégies de faibles émissions de GES à long terme, dont les versions révisées vont bientôt être soumises à l'UNFCCC, dans le cadre de l'accord de Paris, devront donc évaluer explicitement les ressources naturelles renouvelables et les conséquences d'une stratégie optimale de décarbonation.

Défis et opportunités pour les pays en développement

En principe, **les pays développés devraient progresser plus rapidement**, du fait de leur plus grande responsabilité pour les émissions passées et de leurs revenus plus élevés, qui leur permettent d'absorber plus facilement l'impact faible mais non nul sur les niveaux de vie.

L'ETC pense donc que l'objectif global doit être le suivant :

- Toutes les économies développées atteignent la neutralité carbone d'ici 2050 au plus tard.
- Toutes les économies en développement atteignent la neutralité carbone d'ici 2060 au plus tard.

Mais **certains pays en développement peuvent être capables d'atteindre la décarbonation complète d'ici à 2050, ou plus tôt**, pour un coût additionnel minimal par rapport à l'objectif de 2060. En effet, certaines économies en développement ont la chance de disposer d'importantes ressources solaires et éoliennes, ce qui réduit de façon spectaculaire les coûts de décarbonation. Certaines ont également des systèmes électriques si peu développés actuellement qu'il leur est possible de « sauter les étapes » et **mettre en place « du premier coup » des systèmes énergétiques neutres en carbone**, en tirant parti des technologies appropriées les plus compétitives en termes de coûts.

Deux pays sont particulièrement importants pour l'évolution des émissions mondiales, étant donné leur part potentielle dans les émissions actuelles ou futures, le rythme de l'augmentation de leurs émissions en l'absence d'une transition vers une énergie propre, et l'exemple qu'ils donnent aux autres pays en développement.



À l'heure actuelle, **la Chine** est encore considérée en développement, avec un PIB par habitant (calculé sur la base de la parité du pouvoir d'achat) d'environ 40 % inférieur à ceux des pays d'Europe de l'Ouest. Mais elle affiche un objectif national clair, celui de devenir une « économie riche et développée » d'ici à 2050. En raison de son épargne et de ses investissements, de sa dotation en ressources naturelles et de son leadership technologique dans de nombreux secteurs stratégiques, elle pourrait et devrait réussir à atteindre l'objectif de neutralité carbone de son économie.



En **Inde**, la croissance économique requiert une augmentation extrêmement importante de l'offre d'électricité pour soutenir la croissance économique, élever le niveau de vie et étendre rapidement l'usage de la climatisation et l'électrification du transport de surface. Cette augmentation peut se produire même en décarbonant aussi l'offre électrique. L'analyse du cas indien par l'ETC⁷ montre que la part de l'électricité solaire ou éolienne dans la production électrique indienne actuelle peut augmenter de 8 % à environ 32 % d'ici 2030 (la part de la production totale zéro-carbone ou à faibles émissions s'élevant à 47 %), tout en doublant la production totale d'électricité. L'étude montre aussi que les coûts ne seraient pas plus élevés que ceux encourus si la croissance s'appuyait sur une augmentation continue de l'usage du charbon.

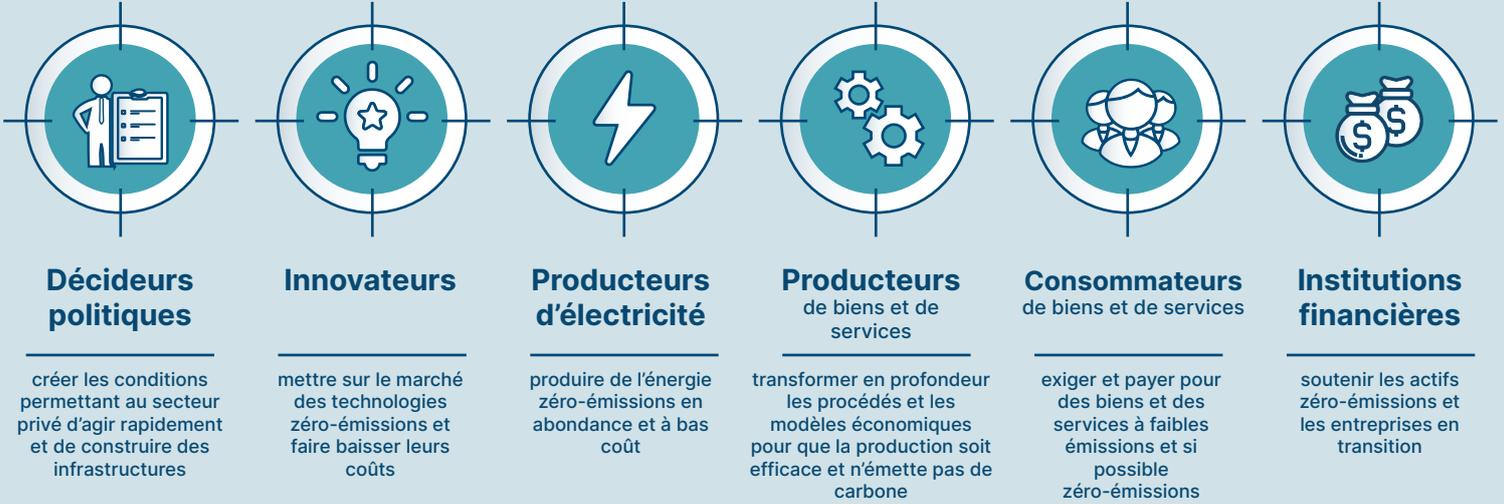
Étant donné la chute des coûts globaux de l'électricité produite avec des renouvelables, il est sans nul doute possible d'assurer que tout développement du système électrique pour satisfaire la demande croissante d'électricité doit être neutre en carbone. Il n'y a **aucune nécessité de construire de nouvelles capacités de production électrique à partir du charbon dans le monde** pour soutenir la croissance économique et l'amélioration des niveaux de vie. Mais le défi subsiste en ce qui concerne l'abandon progressif des centrales à charbon. Les stratégies pour réduire et finalement éliminer les émissions dues aux installations existantes fonctionnant au charbon devront faire intervenir deux solutions : l'ajout du CCS aux centrales à gaz et à charbon, utilisées en back-up pour les variations saisonnières ou de pointe (même si cela implique inévitablement l'augmentation des coûts de fonctionnement du système total), et la fermeture de centrales à gaz et à charbon avant leur fin de vie.

Enfin, la progression vers une économie zéro-carbone dans les pays déjà développés ne sera en aucun cas contrainte par une « pénurie de capital », ni un « coût du capital » élevé. Ce ne sera pas une contrainte en Chine non plus, étant donné les taux d'épargne et d'investissement, et l'influence de l'État sur le système financier, qui garantit un financement à bas coût des investissements. Cependant, dans plusieurs autres pays en développement, **le coût du capital est bien plus important que dans les économies développées**, et tant le caractère limité du capital disponible que son coût élevé peuvent constituer un frein sérieux à la progression de l'investissement dans un nouveau système énergétique. Il est essentiel d'élaborer des politiques spécifiques à la **mobilisation des flux de capitaux à un coût suffisamment faible**, notamment sous forme de financement concessionnel de la part des pays développés.

7. T. Spencer, N. Rodrigues, R. Pachouri, S. Thakre, G. Renjith, TERI (2020), *Renewable Power Pathways: Modelling The Integration Of Wind And Solar In India By 2030* and R. Pachouri, T. Spencer and G. Renjith, TERI, (2018), *Exploring Electricity Supply-Mix Scenarios to 2030*.

Agir avant 2030 pour atteindre la neutralité carbone d'ici 2050

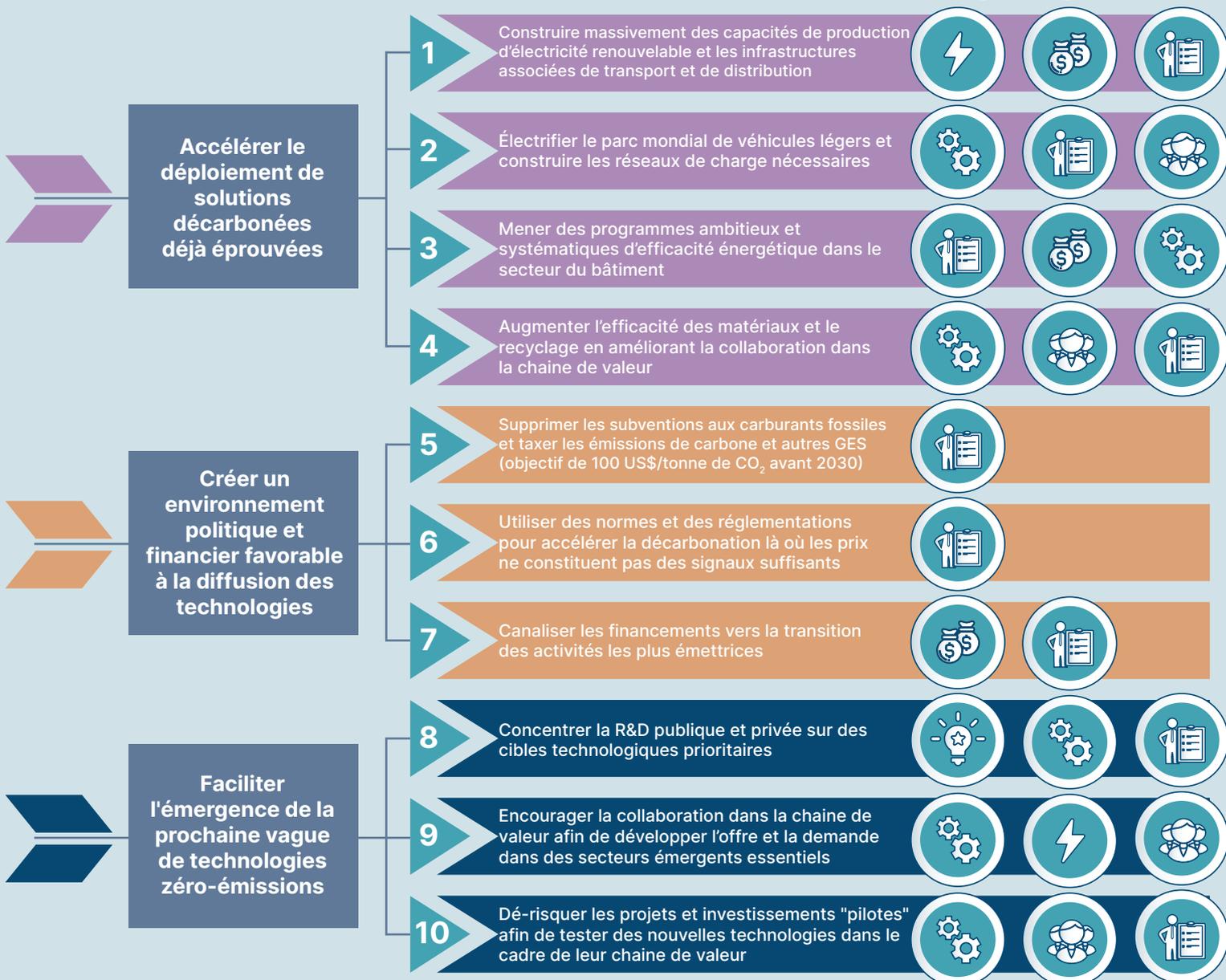
Une responsabilité partagée



Objectifs 2030

10 priorités essentielles

Responsabilités principales



IV. Les actions requises aujourd'hui afin d'atteindre la neutralité carbone en 2050

Il est essentiel de se mettre d'accord sur l'objectif zéro-émissions à atteindre d'ici 2050. Mais il est également essentiel d'identifier et de mettre en œuvre les actions et les politiques nécessaires dès maintenant pour que cet objectif soit atteint. Cela devra se faire rapidement, pour deux raisons :

- D'abord, si le monde pense sérieusement atteindre l'objectif de réduction de la température globale d'1,5 °C, il faut réduire les émissions de CO₂ de 20 Gt par an d'ici 2030 environ, mais nous sommes **bien loin d'être sur la bonne voie pour y réussir**. La crise de la COVID-19 a eu pour effet une réduction de court terme des émissions mondiales, mais celles-ci vont reprendre rapidement avec la relance des économies. Les tendances sous-jacentes, ainsi que les politiques et les engagements annoncés (comme définis dans les Contributions déterminées au niveau national (NDC), déclarées par chaque pays dans le cadre de l'Accord de Paris) ont mis le monde sur la voie d'émissions de CO₂ de 35 Gt en 2030, et 3 °C de réchauffement d'ici la fin du siècle.
- Ensuite, **il sera impossible d'arriver à la neutralité carbone d'ici 2050 sans progrès considérables dans des domaines spécifiques d'ici 2030**, l'évolution actuelle des investissements, des technologies et des politiques étant bien trop lente pour que l'objectif soit réalisable en continuant dans cette voie.

On peut considérer que les transformations technologiques du type de celles qui sont actuellement nécessaires impliquent trois phases : l'*émergence* d'une nouvelle technologie, sa *diffusion* à une échelle significative et enfin, la phase de la *nouvelle norme*, lorsque le système entier a adopté cette nouvelle technologie devenue conventionnelle. La nature des actions requises de la part des politiques et du financement du secteur industriel pendant cette décennie diffère selon les technologies en fonction du stade de leur évolution. Trois ensembles d'actions sont nécessaires au cours de la prochaine décennie pour accélérer l'évolution selon ces trois phases.

En tout premier lieu, nous devons accélérer le déploiement de l'électricité zéro-carbone et des autres techniques et modèles économiques reconnus pour réduire les émissions. Là où il existe des solutions à faibles émissions de carbone à des coûts similaires ou inférieurs à ceux des solutions à émissions plus importantes, il faut mettre l'accent sur le déblocage d'investissements visant à déployer rapidement ces solutions au cours de la prochaine décennie et à obtenir des réductions majeures des émissions à court terme.

- Dans le **secteur de l'électricité**, la priorité vitale n'est pas le développement technologique (sauf pour certains procédés de stockage), mais de maintenir le rythme de l'investissement dans les renouvelables à un niveau suffisant pour soutenir l'électrification propre et mettre le secteur sur la voie de la neutralité carbone. Les décisions politiques nécessaires vont impliquer de définir des objectifs quantitatifs clairs pour le développement de l'électricité zéro-carbone (solaire et éolienne principalement) d'ici 2030, et pour la réduction de l'intensité carbone de la production d'électricité (mesurée en grammes par kWh), soutenue par une structure adaptée du marché de l'électricité et des mécanismes de financement (notamment des financements concessionnels dans les pays en développement).
- Dans les autres secteurs où se détache nettement une voie préférentielle vers la décarbonation à bas coût, comme dans **le transport de surface, le chauffage des bâtiments et la circularité des matériaux**, la priorité essentielle est d'assurer le déploiement rapide de ces solutions en renforçant les arguments économiques favorables à la transition par des réglementations claires et contraignantes (par exemple, l'interdiction de ventes de nouveaux véhicules légers à moteur à combustion interne dès le début 2030, proposition de financements pour couvrir le coût initial de rénovation des bâtiments), suppression des obstacles non-économiques (par exemple, amélioration de la collecte des déchets pour augmenter la qualité et la quantité du recyclage) et mobilisation des capitaux appropriés.

En second lieu, nous devons créer les environnements de régulation et d'investissement adéquats afin de favoriser la diffusion des technologies dans tous les secteurs où certaines technologies sont prêtes à être commercialisées mais pas encore rentables.

Les mix de technologies spécifiques et les politiques climatiques doivent être adaptés à la situation et aux politiques nationales existantes, et de ce fait varieront selon le pays considéré. Les priorités les plus importantes sont au nombre de trois :

- La première est de s'assurer que la tarification des externalités soit adéquate, en supprimant toute subvention aux combustibles fossiles existante, en employant des mécanismes explicites de tarification du carbone, et en appliquant le principe du pollueur-payeur. Pour éviter les problèmes de compétitivité inhérents à la tarification du carbone pour des marchandises échangées internationalement, en l'absence d'accords internationaux sur cette tarification, ces mesures doivent être associées à des ajustements fiscaux aux frontières. Des mesures axées sur le marché, bien conçues, peuvent constituer des leviers très importants, parce qu'elles réduisent les émissions et encouragent l'innovation, ce qui contribue à la flexibilité des entreprises.
- La deuxième priorité concerne les secteurs pour lesquels les prix du carbone sont probablement insuffisants pour déclencher une transition des choix d'achat et d'investissement. Les gouvernements doivent alors mettre en place des normes et des réglementations pour établir des objectifs explicites, réduire l'incertitude des marchés et donc faciliter les investissements. Cela peut prendre la forme de normes d'émissions de GES, de mandats réglementaires relatifs aux énergies ou aux carburants renouvelables, et d'interdictions visant les produits les plus intensifs en carbone.
- La troisième priorité concerne les investissements majeurs à réaliser au cours de cette décennie, dans l'offre d'énergie et les installations industrielles (nouvelles constructions ou rénovations) afin de réussir la décarbonation complète de l'économie. Pour canaliser les investissements dans les activités de transition, il faut mettre en place un environnement politique adéquat, une feuille de route des investissements qui identifie clairement les besoins, une évaluation des risques et des opportunités relatifs à la transition sectorielle destinée aux institutions financières, une définition commune de ce qui est entendu par le financement la transition, et la mobilisation des finances publiques pour supprimer les risques relatifs à des investissements inédits.

Enfin, nous devons nous assurer que la prochaine vague de technologies zéro-carbone sera sur le marché à la fin de cette décennie au plus tard.

Pour arriver à cet objectif, **le financement des innovations, tant par le secteur public que privé**, doit soutenir le développement de technologies qui sont encore à la phase d'émergence, en particulier celles qui intéressent de nombreux secteurs. Ce sont notamment la production d'hydrogène par électrolyse, celle d'hydrocarbures de synthèse, les techniques de CCS/U et les biocarburants produits à partir des sources de matières premières les plus durables [Figure G].

De plus, le déploiement initial de ces technologies à un niveau commercial va nécessiter des **mécanismes d'atténuation des risques** afin de réduire les coûts (opérationnels et du capital) et évidemment les risques (notamment technologiques ou commerciaux), à tous les niveaux de la chaîne de valeur. Les modèles innovants de partage des risques et les mécanismes d'aides publiques doivent se tourner vers de nouveaux partenariats industriels (par exemple des joint-ventures ou des accords d'écoulement de production), des produits financiers innovants (comme de nouvelles formes d'assurance), et des mécanismes sur mesure d'aides publiques (tels que des avantages fiscaux, des subventions, des mécanismes financiers mixtes, des commandes publiques et des partenariats public-privé).

Par-delà l'innovation, le défi auquel sont confrontées les technologies émergentes est de dépasser le **problème de « l'œuf et la poule »**, qui peut ralentir leur développement : des applications immédiates sont écartées en raison de coûts trop élevés, il devient alors difficile pour les producteurs d'obtenir des économies d'échelle et des effets de courbe d'apprentissage, leur permettant de réduire leur coût rapidement. Pour résoudre cette situation, l'action doit être coordonnée sur l'ensemble des chaînes de valeur essentielles pour renforcer la demande de produits nouveaux à un rythme cohérent avec la montée en puissance de leur production.

Domaines d'innovations prioritaires pour décarboner complètement l'économie

● Innovation incrémentale ● Innovation de rupture



Électrification

Batteries plus denses en énergie et moins coûteuses

Pompes à chaleur plus efficaces et moins coûteuses

Fours électriques pour le ciment et les produits chimiques

Réduction électrochimique du fer pour la production d'acier



Hydrogène

Électrolyse moins coûteuse (objectif 200 \$/KW)

Réservoirs et piles à hydrogène moins coûteux

Transport longue distance de l'hydrogène par pipelines de grande capacité

Stockage géologique de grande taille (dans des grottes de sel ou de roche)

Turbines et moteurs de bateau à l'ammoniac ou à l'hydrogène



Chimie biologique et de synthèse

Efficacité accrue de la transformation de la biomasse de lignocellulose et d'algues

Production moins coûteuse de carburants synthétiques par association d'hydrogène et de CO₂

Réduction électrochimique du fer pour la production d'acier

Nouveaux produits chimiques fabriqués à partir de matières premières biologiques ou synthétiques



Efficacité et circularité des matériaux

Nouveaux modèles de produits de consommation

Traçabilité des matériaux, collecte, technologies de tri et de recyclage

Nouveaux modèles économiques : produit en tant que service, partage



Nouveaux matériaux

Chimie du ciment et du béton à faible carbone

Biomatériaux pour la construction

Fibres à base de cellulose pour remplacer les plastiques



Capture et utilisation du carbone

Capture du carbone améliorée, particulièrement pour le ciment

Capture directe du CO₂ dans l'air à un coût plus faible

Utilisation du carbone dans le ciment, les agrégats et la fibre de carbone



Alimentation, sols et océans

Agriculture de précision et numérique, agriculture régénératrice

Amélioration des technologies de stockage pour les chaînes d'approvisionnement et frigorifiques

Protéines alternatives, notamment culture de viande in vitro

Production à grande échelle de goémon (algues marines)

Figure G

SOURCE : SYSTEMIQ pour l'Energy Transitions Commission (2020)



Bioénergie : Énergie renouvelable provenant de matières dérivées de sources biologiques. Dans le présent rapport, le terme « bioénergie durable » désigne la bioénergie produite à partir de biomasse durable (voir la définition de « biomasse ou matières premières biologiques »).

Bioénergie avec captage et stockage de dioxyde de carbone (BECCS) :

Technologie qui associe bioénergie et capture et stockage du carbone pour produire des émissions négatives nettes de gaz à effet de serre.

Biomasse ou matières premières biologiques :

Matière organique (biologique) disponible de façon renouvelable. Ce terme désigne notamment les matières premières dérivées des animaux ou des plantes, comme les récoltes agricoles et les produits forestiers, ainsi que les déchets domestiques ou industriels. Dans le présent rapport, le terme « biomasse durable » est utilisé pour décrire des matières organiques qui sont renouvelables, qui ont une empreinte carbone proche de zéro ou nulle sur leur durée de vie (en prenant en compte le coût d'opportunité du sol), et dont les pratiques de culture et de récolte sont réalisées en prenant en considération des principes écologiques comme la biodiversité et la santé des sols et des terres.

Capture directe du CO₂ dans l'air (DAC) :

Extraction du dioxyde de carbone de l'atmosphère.

Capture, stockage ou utilisation du CO₂ capté (CCS/U) :

La « capture du carbone » désigne le procédé permettant de récupérer le CO₂ produit par des procédés industriels ou de production d'énergie, à l'exclusion de la capture directe dans l'air. Le CCS, ou « capture et stockage du carbone », désigne la combinaison de la capture au stockage géologique du carbone, alors que le CCU, ou « capture et utilisation du carbone », désigne son utilisation dans des produits à base de carbone (comme le ciment, les agrégats, la fibre de carbone).

Carburants de synthèse :

Hydrocarbures liquides produits par synthèse à partir de d'eau, de dioxyde de carbone et d'électricité. Ils sont zéro-carbone si l'électricité utilisée est zéro-carbone et le CO₂ est obtenu par capture directe dans l'air. Ils sont désignés par plusieurs termes en anglais : synfuels, power-to-fuel ou electro-fuels (e-fuels).

Compensations carbone : Réductions des émissions de dioxyde de carbone (CO₂) ou de gaz à effet de serre réalisées par une entreprise, un secteur ou une économie, afin de compenser des émissions produites ailleurs dans l'économie.

Consommation d'énergie finale : Toute l'énergie fournie au consommateur final dans l'ensemble des usages énergétiques.

Consommation d'énergie primaire : Énergie brute directement utilisée à sa source ou fournie aux consommateurs sans transformation. C'est donc une énergie qui n'a été soumise à aucun procédé de conversion ou transformation.

Coût actualisé de l'électricité (LCOE) :

Mesure du coût net moyen actuel de la production électrique pour une centrale électrique, sur toute sa durée de vie. Ce coût est calculé en divisant tous les coûts actualisés sur la durée de vie d'une centrale de production d'électricité par la somme actualisée des quantités d'énergie effectivement fournies.

Économie zéro-carbone/neutre en carbone/décarbonée :

Ces termes désignent indifféremment la situation dans laquelle un secteur économique donné n'émet pas de CO₂, soit parce qu'il n'en produit pas, soit parce qu'il capte le CO₂ produit pour l'utiliser ou le stocker. Dans cette situation, il ne devrait presque pas être fait usage de compensations de la part d'autres secteurs (« véritable neutralité carbone nette »). Les seules émissions restantes à compenser seraient attribuables à des fuites au niveau de la capture de carbone, ou dans le secteur agricole ou encore pour des émissions incontrôlables en fin de vie.

Électrolyse : Procédé utilisant le courant électrique pour déclencher une réaction chimique non spontanée. Ce procédé peut être réalisé dans un électrolyseur et être appliqué à l'eau pour la décomposer en oxygène et en hydrogène, alors appelé « hydrogène vert ». Il peut être zéro-carbone si l'électricité utilisée est elle-même zéro-carbone.

Gaz à effet de serre (GES) : Gaz piégés dans l'atmosphère : CO₂ (76%), méthane (16%), protoxyde d'azote (6%) et gaz fluorés (2%).

Hydrocarbures : Composés chimiques organiques, exclusivement constitués d'atomes d'hydrogène et de carbone. Les hydrocarbures sont des composés trouvés dans la nature et sont la base du pétrole brut, du gaz naturel et d'autres sources d'énergie importantes.

Moteur à combustion interne (MCI) : Moteur traditionnel, alimenté par l'essence, le diesel, des biocarburants ou du gaz naturel. L'ammoniac et l'hydrogène peuvent également lui servir de carburant.

Prix du carbone : Un mécanisme de tarification imposé par le gouvernement, pouvant être de deux types : taxation des produits et services sur la base de leur intensité en carbone, ou système de quotas avec plafond des émissions permises au niveau d'un pays ou d'une région, et possibilité accordée aux entreprises d'échanger des droits à produire des émissions (permis).

Productivité énergétique : Énergie utilisée par unité de PIB.

Puits de carbone naturels : Réservoirs naturels qui stockent plus de CO₂ qu'ils n'en émettent. Les forêts, les plantes, les sols et les océans sont des puits de carbone naturels.

Reformage du méthane à la vapeur (SMR) : Procédé par lequel le méthane du gaz naturel est chauffé et réagit avec la vapeur pour produire de l'hydrogène.

SMR avec capture et stockage du carbone (SMR+CCS) : Production d'hydrogène par reformage à la vapeur (voir ci-dessus), où le carbone émis par la combustion du gaz naturel est capté pour être réutilisé ou stocké.

Sources d'énergie zéro-carbone ou décarbonées : Terme utilisé pour désigner les énergies renouvelables (notamment l'énergie solaire, éolienne, hydraulique et géothermique), la biomasse durable et les combustibles fossiles et nucléaires seulement si leur usage peut être décarboné par capture du carbone.

Turbine à gaz à cycle combiné (CCGT) : Ensemble de moteurs thermiques fonctionnant par deux à partir d'une même source de chaleur pour la transformer en énergie mécanique, alimentant à son tour des générateurs électriques.

VEB : Véhicule électrique à batterie

Véhicule électrique à pile à combustible FCEV : Véhicule électrique utilisant une pile à combustible produisant de l'électricité pour alimenter un moteur, employant généralement l'oxygène de l'air et de l'hydrogène comprimé.

Remerciements

Les personnes suivantes ont fait partie de l'équipe ayant élaboré ce rapport :

Lord Adair Turner (président), Faustine Delasalle (directrice), Laëtitia de Villepin (responsable de la recherche), Meera Atreya, Scarlett Benson, Ita Kettleborough, Alasdair Graham, Alex Hall, Hettie Morrison, Sanna O'Connor, Aparajit Pandey, Lloyd Pinnell, Elena Pravettoni, Caroline Randle and Janike Reichmann (SYSTEMIQ).

Ce rapport se fonde sur des analyses effectuées par nos partenaires de recherche pour l'Energy Transitions Commission (ETC) au cours des dernières années. Nous souhaitons remercier les personnes suivantes pour la qualité de leurs contributions :

David Nelson, Felicity Carus and Brendan Pierpont (Climate Policy Initiative); Cecilia Gustafsson and Carl von Utfall Danielsson (Copenhagen Economics); Per Klevnäs, Anders Ahlen and Cornelia Jonsson (Material Economics); Arnout de Pee, Eveline Speelman, Hamilton Boggs, Cynthia Shih and Maaïke Witteveen (McKinsey & Company); Ji Chen, Yiyao Cao, Thomas Koch Blank, Ye Agnes Li, Shuyi Li, Ruosida Lin, Meng Wang, Zhe Wang and Caroline Zhu (Rocky Mountain Institute); Tugce Balik, Naseer Chia, Anne-Caroline Duplat, Antonio E Gelorz, Saira George, Thea Jung, Sachin Kapila, Alessandra Kortenhorst, Isabel Lewren, Jeremy Oppenheim, Ricardo Santana, William Sheldon and Tove Stühr Sjöblom (SYSTEMIQ); Will Hall, Raghav Pachouri, Neshwin Rodrigues, Thomas Spencer, Shubham Thakre and G Renjith (The Energy and Resources Institute); Tristan Smith and Carlo Raucci (University Maritime Advisory Services); Jason Eis, Philip Gradwell, Cor Marjjs and Thomas Nielsen (Vivid Economics).

L'équipe tient à remercier le réseau et les partenaires de l'ETC pour leur contribution active :

Elke Pfeiffer (Allianz); Javier Bonaplata, David Clarke and Nicola Davidson (ArcelorMittal); Abyd Karmali (Bank of America); Albert Cheung (BloombergNEF); Gardiner Hill (BP); Vian Davys (CLP); Dana Barsky (Credit Suisse); Anupam Badola (Dalmia Cement (Bharat) Limited); Bin Lyu (Development Research Center of the State Council); Rebecca Heaton and Ross McKenzie (DRAX); Laura Armitage and Adil Hanif (EBRD); Anton Butmanov and Aleksandra Gundobina (EN+); Rob Kelly and Wei Sue (Energy Transitions Initiative Australia); Michael Ding and Olivia Sang (Envision); Dries Acke, Tom Brookes and Pete Harrison (European Climate Foundation); Bob Ward (Grantham Institute, London School of Economics); Matt Gorman (Heathrow Airport); Andrea Griffin (HSBC); Francisco Laveran (Iberdrola); Chris Dodwell (Impax Asset Management); Christopher Kaminker (Lombard Odier); Elizabeth Watson (Modern Energy); Matt Hinde and Nick Saunders (National Grid); Jakob Askou Bøss and Anders Holst Nymark (Ørsted); Tom Pakenham (Ovo Energy); Xavier Chalbot and Jonathan Grant (Rio Tinto); Elizabeth Hartman and Ned Harvey (Rocky Mountain Institute); Mallika Ishwaran and Jennifer Reilly (Royal Dutch Shell); Emmanuel Normant (Saint Gobain); Sandrine de Guio, Emmanuel Laguarrigue and Vincent Petit (Schneider Electric); Xing Lu (Sinopec Capital); Camilla Palladino (SNAM); Jesper Kansbod and Martin Pei (SSAB); Gabriella Larson and Kristian Marstrand Pladsen (Statnett); Brian Dean (Sustainable Energy For All); Abhishek Goyal (Tata Group); AK Saxena (The Energy and Resources Institute); Reid Detchon (United Nations Foundation); Mikael Nordlander (Vattenfall); Johan Engebratt and Niklas Gustafsson (Volvo Group); Dean Cambridge and Jennifer Gerholdt (We Mean Business); Jennifer Layke (World Resources Institute).

Photographie sur la page opposée par chuttersnap



Une économie mondiale zéro-carbone?

Synthèse du rapport

Mission réalisable

Septembre 2020

Version 1.0



Energy
Transitions
Commission