

MISSION POSSIBLE

ATTEINDRE LA NEUTRALITÉ CARBONE DANS LES SECTEURS LES PLUS
DIFFICILES À DÉCARBONISER D'ICI LE MILIEU DU SIÈCLE



SYNTHÈSE DU
RAPPORT





MISSION POSSIBLE

ATTEINDRE LA NEUTRALITE CARBONE DANS LES SECTEURS LES PLUS
DIFFICILES A DECARBONISER D'ICI LE MILIEU DU SIÈCLE

SYNTHÈSE DU RAPPORT

NOVEMBER 2018

L'ENERGY TRANSITIONS COMMISSION

L'Energy Transitions Commission (ETC) rassemble un groupe diversifié de dirigeants issus des secteurs de l'énergie et du climat : investisseurs, entreprises du secteur de l'énergie, industries consommatrices d'énergie, fournisseurs d'équipements, organisations à but non lucratif, universitaires, venus tant d'économies développées que d'économies en développement. Son but est d'accélérer le passage à des systèmes énergétiques à faibles émissions de carbone, qui assurent un développement économique tout en limitant la hausse des températures moyennes dans le monde en-deçà de 2°C et le plus près possible de 1,5°C.

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

Ce rapport « Mission Possible » a été élaboré par les Commissaires avec le soutien du Secrétariat de l'ETC, fourni par SYSTEMIQ. Il se fonde sur un ensemble d'analyses réalisées par Material Economics, McKinsey & Company, University Maritime Advisory Services et par SYSTEMIQ pour l'ETC et en partenariat avec elle, ainsi que d'une revue de littérature.

Les conclusions ont été soumises à un processus de consultation de 6 mois qui a permis de recevoir les réactions et commentaires de près de 200 spécialistes issus d'entreprises, d'initiatives industrielles, d'organisations internationales, d'organisations non gouvernementales et des milieux universitaires.

Ce rapport constitue une vision collective de l'ETC. 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 sont non seulement d'accord sur l'importance d'atteindre la neutralité carbone dans les systèmes énergétiques et industriels d'ici la moitié 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.facebook.com/EnergyTransitionsCommission

www.linkedin.com/company/energy-transitions-commission

www.twitter.com/ETC_energy

NOS COMMISSAIRES

Laurent Auguste

Vice-Président Exécutif, Innovation et Marchés,
Veolia

Pierre-André de Chalendar

PDG, Saint-Gobain

Dominic Emery

Vice-Président, Stratégie du Groupe, BP

Will Gardiner

PDG, DRAX

Didier Holleaux

Vice-Président Exécutif, ENGIE

Chad Holliday

Président du Conseil d'Administration, Royal
Dutch Shell

Gopi Katragadda

Directeur des technologies et responsable de
l'innovation, Tata Sons

Zoe Knight

Directrice générale et directrice de groupe,
Centre pour la Finance Durable, HSBC

Jules Kortenhorst

PDG, Rocky Mountain Institute

Rachel Kyte

Représentante spéciale du Secrétaire Général
des Nations unies; PDG, Sustainable Energy For
All

Mark Laabs

Directeur Général, Modern Energy

Richard Lancaster

PDG, CLP Holdings Ltd

Alex Laskey

Ancien président et fondateur, OPower

Auke Lont

PDG, Statnett

Ajay Mathur

Directeur Général, The Energy and Resources
Institute; Co-Président, Energy Transitions
Commission

Arvid Moss

Vice-Directeur Général, Energie et
Développement commercial, Hydro

Philip New

PDG, Catapult Energy Systems

Nandita Parshad

Directrice générale, Energie et Ressources
naturelles, Banque européenne pour la
reconstruction et le développement

Andreas Regnell

Premier Vice-président, Développement
stratégique, Vattenfall

Mahendra Singhi

PDG, Groupe Dalmia Bharat

Andrew Steer

PDG, World Resources Institute

Nicholas Stern

Professeur, London School of Economics

Nigel Topping

PDG, We Mean Business

Robert Trezona

Associé, Directeur Cleantech, IP Group

Jean-Pascal Tricoire

PDG, Schneider Electric

Laurence Tubiana

PDG, Fondation Européenne pour le Climat

Adair Turner

Coprésident, Energy Transitions Commission

Timothy Wirth

Vice-Président, Fondation des Nations Unies

Lei Zhang

PDG, Groupe Envision

Changwen Zhao

Directeur Général, Département de l'économie
industrielle, Centre de recherche pour le
développement du Conseil d'État de Chine

Cathy Zoi

PDG, EVgo

RECHAUFFEMENT
CLIMATIQUE

TRES EN-DEÇA
DE 2°C

MISSION POSSIBLE

Pour limiter le réchauffement global très en-deça de 2°C
et au plus près de 1,5°C, le monde doit atteindre la
neutralité carbone d'ici le milieu du siècle.

CO₂-EMISSIONEN

NET ZERO CO₂
D'ICI LE MILIEU DU
SIECLE

LE DEFI MAJEUR POUR RESPECTER L'ACCORD DE PARIS RESIDE DANS
LES SECTEURS LES PLUS DIFFICILES A DECARBONISER :

INDUSTRIE
LOURDE



CIMENT



ACIER



PLASTIQUES

TRANSPORT
LOURD



TRANSPORT
ROUTIER LOURD

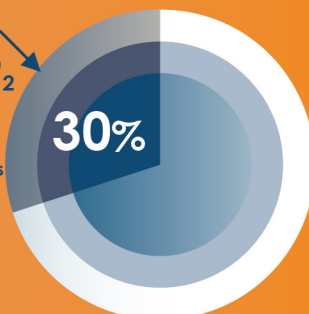


TRANSPORT
MARITIME



AVIATION

10GtCO₂
d'émissions
totales annuelles
de carbone
provenant de
l'énergie et de
l'industrie...



...et leur part dans les émissions restantes va
croître à mesure que d'autres secteurs, comme
l'électricité, la construction et le transport léger
seront décarbonisés.

PARVENIR À LA NEUTRALITE CARBONE DANS LES SECTEURS LES PLUS DIFFICILES A DECARBONISER
D'ICI LE MILIEU DU SIECLE EST POSSIBLE

TECHNIQUEMENT



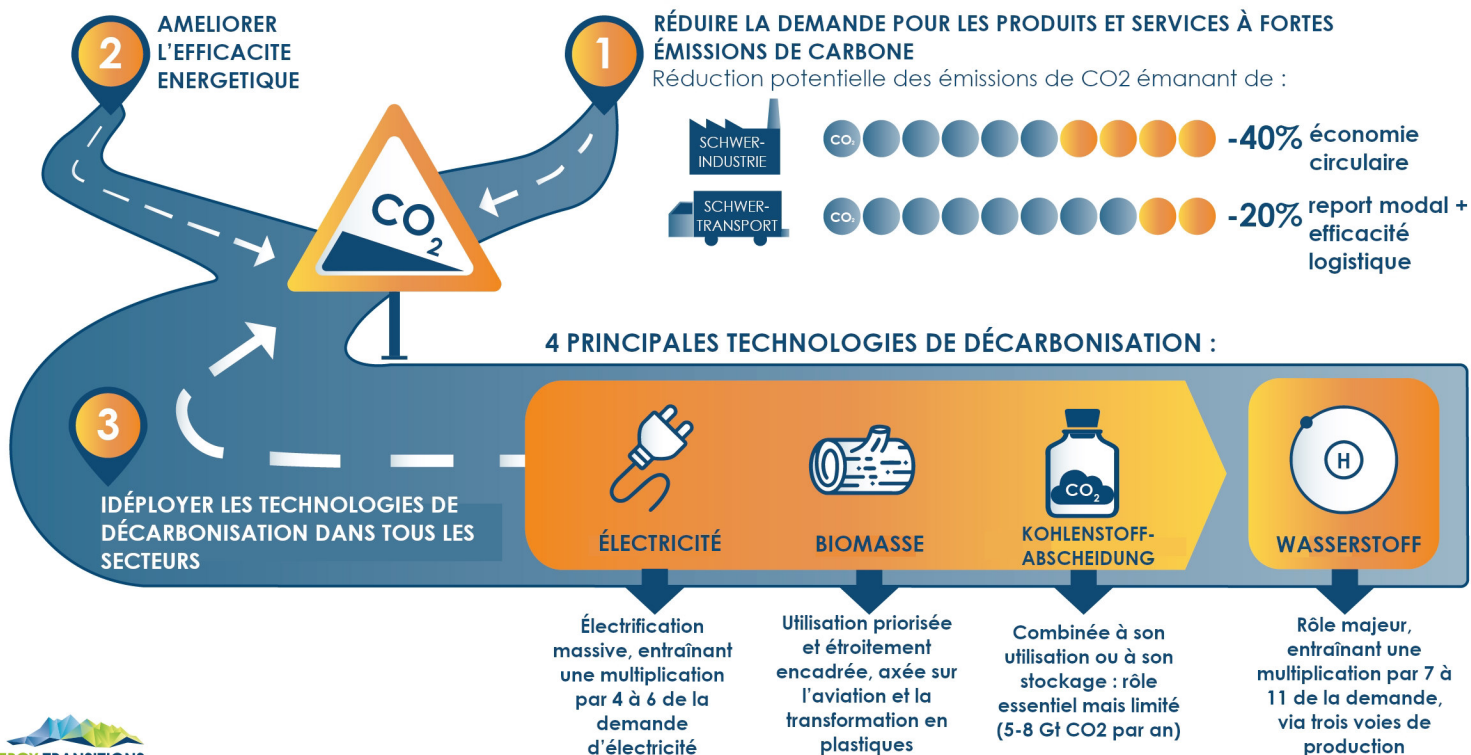
Les technologies requises
sont commercialisées ou en
cours de développement.

ECONOMIQUEMENT



Cela coûtera moins de 0,5 % du
PIB.

IL EXISTE TROIS ROUTES COMPLEMENTAIRES POUR DECARBONISER CES SECTEURS



L'accord de Paris sur le climat a engagé le monde à **limiter le réchauffement climatique bien en-deçà de 2°C et à le maintenir aussi proche que possible de 1,5°C au-dessus des niveaux préindustriels**. Le dernier rapport du GIEC¹ a mis en garde contre les effets néfastes majeurs pour la planète et pour l'humanité d'une hausse des températures globales de 1,5°C, et des conséquences encore plus dramatiques d'un réchauffement global de 2°C. Il exhorte donc le monde à adopter l'objectif de 1,5°C, et recommande de parvenir à la neutralité carbone au niveau planétaire d'ici 2050.

L'Energy Transitions Commission – une coalition de décideurs du monde des affaires, de la finance et de la société civile issus d'une variété d'organisations opérant dans les secteurs de la production et de l'usage de l'énergie – soutient l'objectif idéal d'une limitation du réchauffement global à 1,5°C et, à minima, nettement en-deçà de 2°C.

Pour avoir une chance d'atteindre l'objectif de 1,5°C, **il est essentiel que les systèmes énergétiques et industriels atteignent la neutralité carbone nette par eux-mêmes** – c'est-à-dire sans compter indéfiniment sur des achats de compensation carbone aux secteurs de l'agriculture, de la gestion forestière et de la gestion des sols. L'ETC croit fermement que **cela est possible d'ici 2050 dans les économies développées et d'ici 2060 dans les économies en développement**².

Cet impératif constitue également une opportunité. Comme l'a montré la *New Climate Economy*, le **nouveau modèle économique** nécessaire pour éviter les effets néfastes du changement climatique reposera sur une innovation technologique rapide et une plus grande productivité des ressources, créera des emplois dans de nouvelles industries et aura un impact positif sur l'environnement local qui améliorera la qualité de vie.

Il est essentiel d'agir au cours de la prochaine décennie, tant pour assurer les réductions d'émissions immédiatement nécessaires pour limiter la quantité croissante de CO₂ dans l'atmosphère, que pour permettre d'avancer vers la neutralité carbone dans les systèmes énergétiques et industriels d'ici le milieu du siècle.

Atteindre la neutralité carbone dans les systèmes énergétiques et industriels nécessitera **des améliorations rapides en matière d'efficacité énergétique** combinées avec **la décarbonisation de la production électrique** ainsi que **l'électrification d'une part aussi importante que possible de l'économie**³, essentiellement les véhicules légers, l'industrie manufacturière et une part importante de l'énergie liée à l'usage des bâtiments (chauffage, climatisation, cuisson). Dans le premier rapport de l'Energy Transitions Commission – *Better Energy, Greater Prosperity* – publié en avril 2017, nous avons concentré notre attention sur ces défis. Nous avons en particulier montré que les réductions très importantes du coût de production de l'électricité renouvelable et du stockage de l'énergie permettent désormais de planifier des systèmes électriques concurrentiels qui soient presque entièrement dépendants de l'éolien et du solaire (par exemple à 85-90%)⁴.

Toutefois, pour parvenir à une économie entièrement décarbonée, nous devons également **réduire et en fin de compte supprimer les émissions de ce que nous avons appelé les « secteurs les plus difficiles à décarboniser » dans l'industrie lourde (en particulier les secteurs de la cimenterie, de la sidérurgie et des industries plastiques) et les transports lourds (transports routiers, maritimes et aériens)**. Ces secteurs représentent actuellement 10Gt (30%) des émissions globales de CO₂, mais, si l'on suit les tendances actuelles, leurs émissions pourraient atteindre 16Gt d'ici 2050 et, représenter une part croissante des émissions résiduelles alors

¹ Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat (2018), *Réchauffement global de 1,5 °C*

² Si le monde doit parvenir à l'objectif de neutralité carbone nette d'ici le milieu du siècle, des émissions négatives provenant des secteurs de l'agriculture, de la gestion forestière et de la gestion des sols seront nécessaires durant la période de transition pour compenser les émissions résiduelles provenant des systèmes énergétiques et industriels durant les années 2050.

³ Le rythme de l'électrification devra également être coordonné avec le rythme de la décarbonisation de la production électrique.

⁴ Energy Transitions Commission (2017), *Better Energy, Greater Prosperity*

même que le reste de l'économie se décarbonise⁵. À ce jour, la plupart des stratégies nationales – définies dans les Contributions Déterminées au niveau National (NDC) jointes à l'accord de Paris – n'accordent que peu d'attention à ces secteurs.

En 2018, l'ETC s'est donc attachée à définir une voie vers la neutralité carbone dans les secteurs les plus difficiles à décarboniser⁶. La bonne nouvelle est que **cela est techniquement possible d'ici le milieu du siècle à un coût pour l'économie inférieur à 0.5% du PIB mondial**, avec un impact marginal sur le pouvoir d'achat des consommateurs. Les technologies permettant de réaliser cette décarbonisation existent déjà : plusieurs doivent encore atteindre leur viabilité commerciale, mais nous n'avons pas à imaginer des révolutions majeures encore insoupçonnées dans la recherche pour être confiants dans le fait que la neutralité carbone est un objectif accessible. De plus, le coût de la décarbonisation peut être sensiblement réduit grâce à un meilleur usage des matériaux dont la production est fortement émettrice de carbone (par une meilleure efficacité de l'usage des matériaux et un meilleur recyclage) et en limitant la croissance de la demande pour les transports à fortes émissions de carbone (par une meilleure efficacité logistique et un report modal).

Toutefois, **cette transition à la fois nécessaire et techniquement réalisable ne se fera pas sans que les décideurs politiques, les investisseurs et les entreprises ne prennent ensemble des mesures immédiates et volontaristes** pour transformer les systèmes économiques.

Ce rapport s'attache donc tour à tour aux points suivants :

- A. Pourquoi le fait d'atteindre la neutralité carbone nette dans les secteurs les plus difficiles à décarboniser est techniquement et économiquement faisable (p.7) ;
- B. Comment gérer la transition vers la neutralité carbone dans l'industrie lourde et dans les transports lourds (p.25) ;
- C. Ce que les décideurs politiques, les investisseurs, les entreprises et les consommateurs doivent faire pour accélérer le changement (p.31).

⁵ Agence Internationale de l'Energie (2017), *Perspectives des technologies de l'énergie*

⁶ Tout au long de ce rapport, l'ETC présente une quantification dont le but est d'identifier l'ordre de grandeurs utiles aux décideurs et investisseurs, plutôt que de développer un scénario suggérant qu'une prédiction précise est possible. En particulier, le scénario illustratif de l'ETC présente les conséquences pour le système énergétique d'un mix de solutions de décarbonisations cote offre et cote demande à l'horizon du milieu du siècle.

A. MISSION POSSIBLE: ATTEINDRE LA NEUTRALITE CARBONE DANS LES SECTEURS LES PLUS DIFFICILES A DECARBONISER EST TECHNIQUEMENT ET ECONOMIQUEMENT FAISABLE

Il est techniquement possible de décarboniser l'industrie lourde et les transports lourds d'ici le milieu du siècle à un coût total bien inférieur à 0.5% du PIB mondial. Trois ensembles complémentaires de mesures sont nécessaires :

- **Limiter la croissance de la demande** – ce qui peut grandement réduire le coût de la décarbonisation industrielle et, dans une moindre mesure, celle des transports lourds ;
- **Améliorer l'efficacité énergétique** – ce qui peut permettre des progrès rapides en matière de réduction des émissions ;
- **Appliquer les technologies de décarbonisation**⁷ – qui seront essentielles pour parvenir en fin de compte à la neutralité carbone dans les systèmes énergétiques et industriels.

ATTEINDRE LA NEUTRALITE CARBONE NETTE DANS L'INDUSTRIE LOURDE

GESTION DE LA DEMANDE : EFFICACITE DE L'USAGE DES MATERIAUX ET CIRCULARITE

D'ici 2050, une économie plus circulaire peut réduire les émissions de CO₂ provenant des quatre principaux secteurs industriels (cimenterie, sidérurgie, industries plastiques, aluminium) de 40% dans le monde, et de 56% dans les économies développées comme en Europe⁸ [Figure 1]. Cela suppose deux évolutions majeures : (i) un meilleur usage des stocks existants de matériaux grâce au recyclage et au meilleur réemploi des matériaux, (ii) une réduction des exigences matérielles dans les chaînes de valeur essentielles (par exemple le transport, la construction, les biens de consommation, etc.) grâce à une meilleure conception des produits, à une durée de vie allongée des produits et à de nouveaux modèles de partage (comme le covoiturage).

- **La production primaire de plastiques pourrait être réduite de 56%** par rapport à un scénario de statu quo, grâce à la généralisation du recyclage mécanique et chimique et à une moindre utilisation des plastiques dans les principales chaînes de valeur.
- **La production primaire d'acier pourrait être réduite de 37%** par rapport à un scénario de statu quo, grâce à une réduction des pertes dans la chaîne de valeur, une moindre contamination de la ferraille durant le processus de recyclage, une meilleure réutilisation des produits à base d'acier et un passage à de nouveaux systèmes de location et de gestion des véhicules réduisant l'usage d'acier.

⁷ Nous utilisons le terme « technologies de décarbonisation » pour décrire les technologies qui permettent de réduire les émissions de carbone anthropogéniques par unité de produit ou de service par le moyen d'une substitution de combustible ou de matière première, un changement de procédé industriel ou par la capture du carbone. Ceci n'implique pas l'élimination complète de l'utilisation de CO₂. Premièrement, l'utilisation de la biomasse ou de combustibles de synthèse peut entraîner la libération dans l'atmosphère d'un CO₂ qui a été au préalable retiré de l'atmosphère par la croissance de la biomasse ou par la capture directe dans l'air. Deuxièmement, le CO₂ peut continuer d'être incorporé dans les matériaux (par exemple dans des matières plastiques). Nous excluons les technologies d'efficacité énergétique du champ des « technologies de décarbonisation », car elles sont étudiées séparément.

⁸ Analyse de Material Economics pour l'Energy Transitions Commission (2018)

- **La production primaire d'aluminium pourrait être réduite de 40%** en combinant les mêmes approches que pour l'acier.
- Pour la cimenterie, les opportunités de recyclage sont plus limitées, mais **une meilleure conception des bâtiments permettrait de réduire la demande globale de près de 34%.**

Saisir ces opportunités nécessite de changer profondément la conception des produits et les relations entre les acteurs qui interviennent aux différents niveaux de chaque chaîne de valeur. Des politiques volontaristes sont nécessaires pour créer des incitations à une plus grande collaboration entre acteurs.

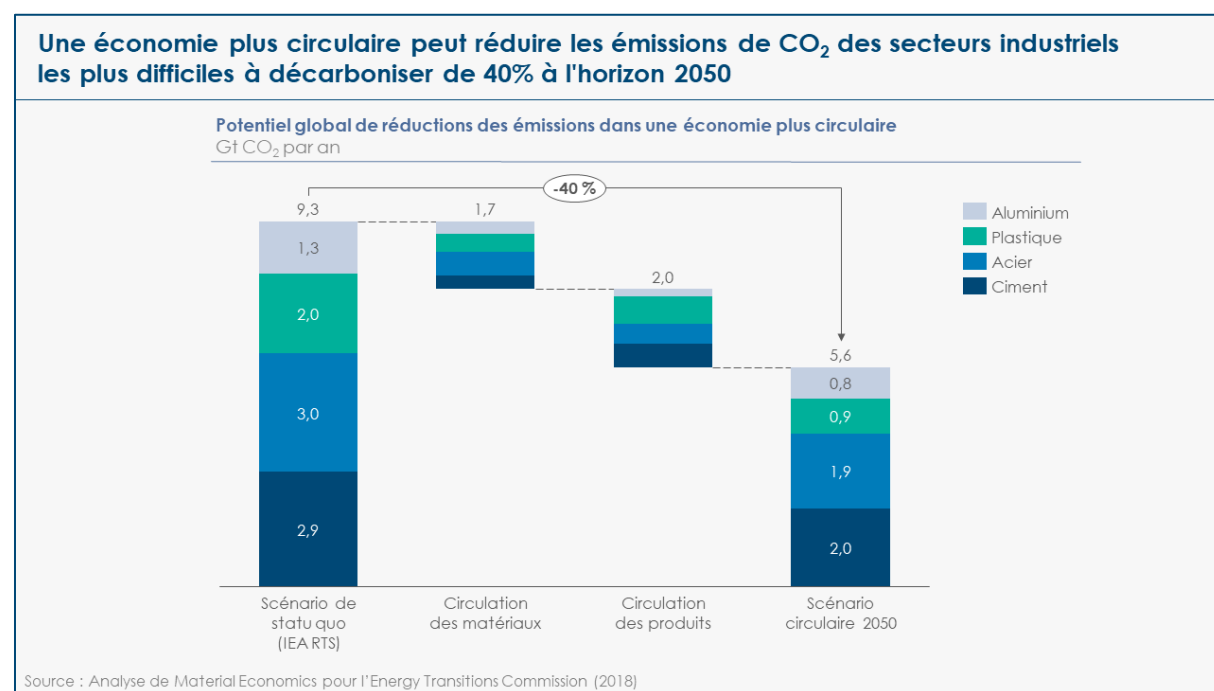


Figure 1

EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE

Dans les secteurs industriels, améliorer l'efficacité énergétique des processus existants peut permettre une réduction des émissions à court terme (au moyen de techniques de production de pointe ou grâce aux technologies numériques). Elles ont peu de chances de dépasser 15 à 20 % de la consommation d'énergie, mais seront essentielles pour réduire les émissions des actifs industriels existants, dont la durée de vie est longue, en particulier dans les pays en développement.

TECHNOLOGIES DE DÉCARBONISATION

Dans chaque secteur industriel, il existe quatre procédés principaux pour assurer la décarbonisation de la production :

- **L'utilisation de l'hydrogène comme source de chaleur ou agent de réduction**, dans le cas de la production d'acier et de produits chimiques, avec de l'hydrogène zéro-carbone produit par électrolyse (qui devrait dominer la production d'hydrogène dans le long terme), l'hydrogène « quasi-zéro-carbone » issu du reformage du méthane à la vapeur (SMR) avec capture du carbone⁹ ;
- **L'électrification directe des procédés industriels**, en particulier pour la production de chaleur à haute température ;
- **L'utilisation de la biomasse comme source d'énergie pour la production de chaleur**, comme agent de réduction dans la production d'acier ou comme matière première, en particulier pour la production de plastique ;
- La **capture du carbone**, combinée avec son utilisation ou avec son stockage souterrain (CCU/S).

Dans chacun des secteurs industriels, le moyen le plus économique de décarboniser **variera vraisemblablement selon le lieu, en fonction des ressources locales**. En particulier, le choix entre les options basées sur l'électricité, d'une part, et la biomasse ou la capture du carbone, d'autre part, se fera en fonction du prix auquel l'électricité zéro-carbone sera disponible localement [Figure 2]¹⁰.

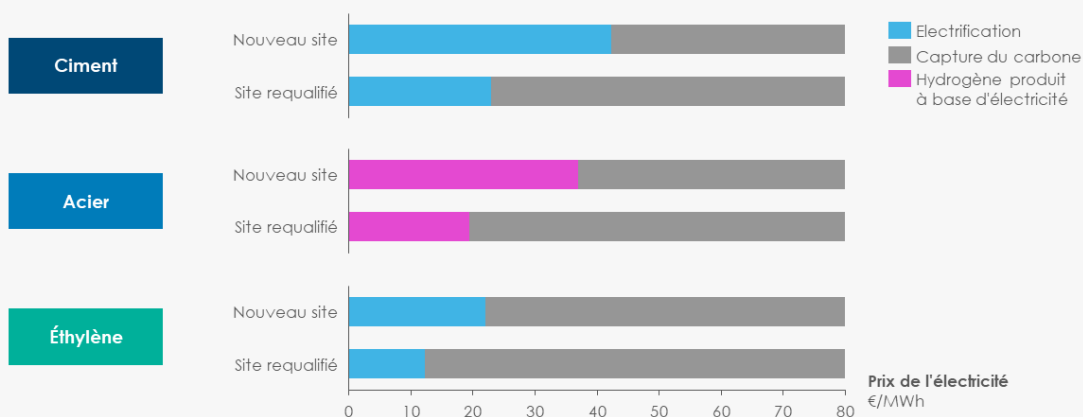
Quelle que soit le procédé de décarbonisation choisi, notre analyse nous rend confiants dans le fait qu'il sera possible de décarboniser l'industrie lourde à un coût par tonne de CO₂ de moins de 55€ pour l'acier, de 115€ ou moins pour le ciment, et de 265€ ou moins pour le plastique (production d'éthylène).

⁹ L'hydrogène zéro carbone peut aussi théoriquement être issu du reformage du biométhane, mais il est improbable que ce type de production joue un rôle important en raison des contraintes pesant sur l'offre de biomasse durable disponible.

¹⁰ La Figure 2 indique quel procédé de décarbonisation sera le plus économique, entre le procédé basé sur l'électricité et celui basé sur la capture du carbone, en fonction du prix de l'électricité zéro-carbone. Le coût de la capture du carbone, quand il est combiné avec un stockage souterrain, peut varier en fonction des géographies. Le coût de la biomasse peut être compétitif dans certaines régions, mais la biomasse n'est pas considérée comme une option prioritaire pour l'industrie en raison de sa disponibilité limitée.

Les processus de décarbonisation basés sur l'électricité peuvent être plus compétitifs que la capture du carbone selon l'industrie et les prix locaux de l'électricité

Voie de décarbonisation la moins chère en fonction du prix de l'électricité
€/tonne de CO₂



Note : Bien que la biomasse puisse être une option compétitive dans certaines régions, elle n'est pas envisagée comme une option prioritaire en raison de la disponibilité limitée des ressources en biomasse.
Source : McKinsey & Company (2018), *Decarbonization of the industrial sectors: the next frontier*

Figure 2

ATTEINDRE LA NEUTRALITE CARBONE DANS LES TRANSPORTS LOURDS

GESTION DE LA DEMANDE : EFFICACITÉ LOGISTIQUE ET REPORTS MODAUX

Les opportunités de réduire la croissance de la demande sont plus limitées dans le secteur des transports que dans les secteurs industriels, car le transport de marchandises est corrélé avec la croissance de l'économie mondiale et le transport de passagers à la hausse de la mobilité dans les économies émergentes. Il n'en reste pas moins que l'application conjointe d'une plus grande efficacité logistique et de reports modaux (report de la route au rail ou au transport maritime, et du transport aérien court courrier au rail à grande vitesse) pourrait permettre de réaliser jusqu'à 20 % de réduction des émissions de CO₂ [Figure 3].

Une meilleure gestion de la demande peut réduire les émissions de CO₂ des transports lourds de 20% à l'horizon 2050

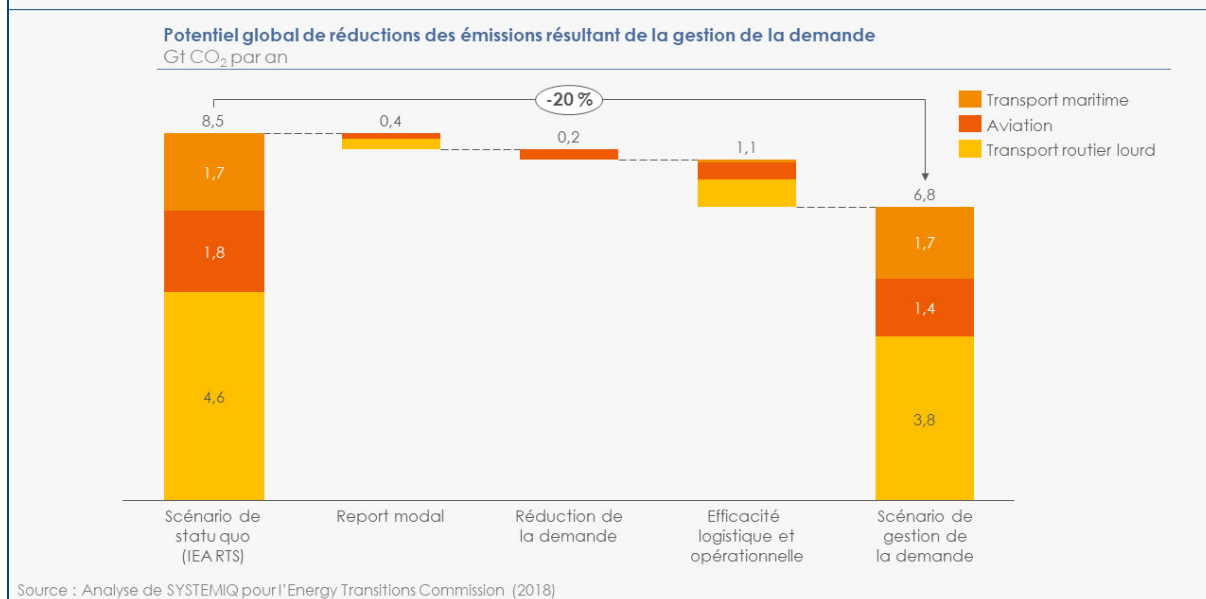


Figure 3

EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE

Il est possible **d'améliorer l'efficacité énergétique des transports lourds de 35-40%** sans changement radical de technologie. Ce potentiel est particulièrement important dans les transports maritimes et aériens, au vu de la longue durée de vie des avions et des navires : améliorer l'efficacité énergétique dans la conception de moteurs et des vaisseaux pourrait réduire de manière significative le coût de la transition vers un carburant zéro-carbone.

TECHNOLOGIES DE DECARBONISATION

La technologie privilégiée pour atteindre une décarbonisation complète et les coûts encourus seront certainement sensiblement différents entre le transport routier, d'une part, et les transports maritimes et aériens, d'autre part [Figure 4].

Les moteurs électriques domineront le transport routier ainsi que le transport maritime et aérien sur courtes distances

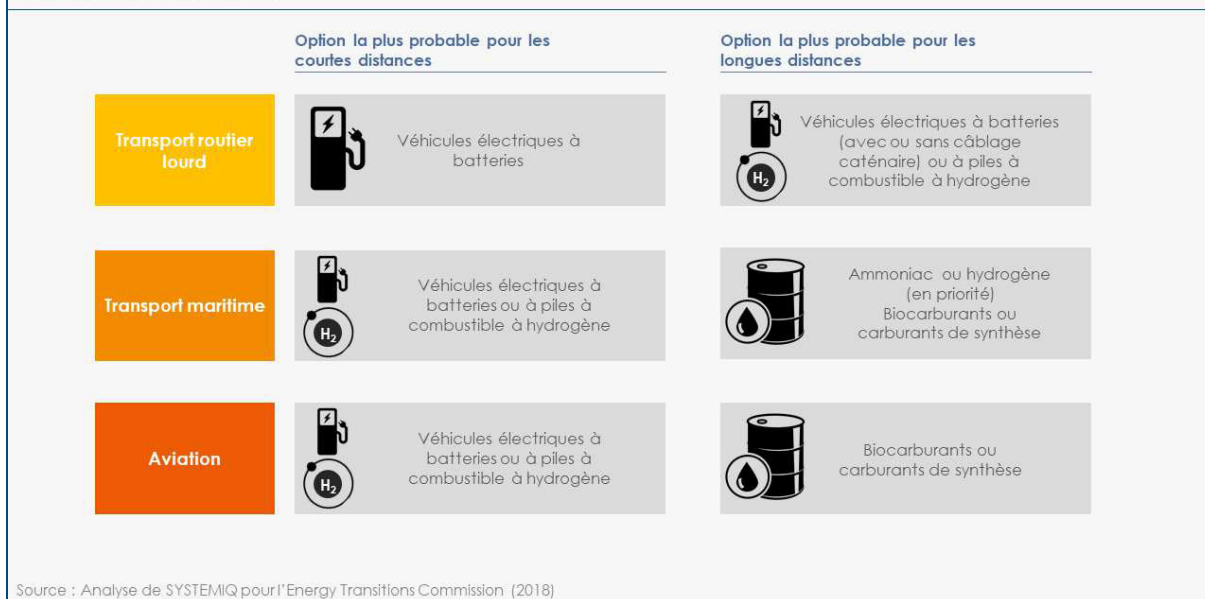


Figure 4

- **Dans le secteur du transport routier, la traction électrique finira très certainement par s'imposer** en raison de son avantage en termes d'efficacité énergétique sur les moteurs à combustion interne. Le stockage de l'énergie se fera alors sous la forme de batteries ou d'un réservoir d'hydrogène. Les camions à traction électrique deviendront vraisemblablement rentables par rapport aux véhicules diesel ou à essence durant les années 2020. En conséquence, l'usage des biocarburants et du gaz naturel dans le transport routier ne devrait être que provisoire.
- **Dans les secteurs des transports maritimes et aériens, les moteurs électriques associés à un stockage de l'énergie par batterie ou réservoir d'hydrogène joueront vraisemblablement un rôle dans le transport sur courtes distances.** Mais, à moins d'une percée technologique majeure en matière de densité des batteries, le transport aérien de longue distance utilisera soit du biokérosène, soit du kérosène synthétique, tandis que le transport maritime de longue distance utilisera de l'ammoniac ou (dans une moindre mesure) du biodiesel¹¹ dans les moteurs existants. Ces carburants étant vraisemblablement plus chers que les carburants fossiles existants, les coûts de décarbonisation pourraient être de 100-200€ par tonne de CO₂ pour le transport aérien et de 130-300€ pour le transport maritime, bien que des progrès technologiques et des économies d'échelle dans la production puissent à terme faire baisser ces coûts.

¹¹ En raison des contraintes sur les réserves et la production durables de biomasse, l'usage de bioénergie doit être limitée dans les secteurs qui bénéficient d'options alternatives de carburant à faibles émissions carbone.

UN COUT MINIMAL POUR L'ECONOMIE ET POUR LES CONSOMMATEURS

COÛT POUR L'ÉCONOMIE MONDIALE

Les coûts marginaux de décarbonisation, estimés sur la base des technologies existantes, varient largement selon les secteurs, cependant, dans la plupart des secteurs les plus difficiles à décarboniser, ces coûts sont relativement importants [Figure 5].

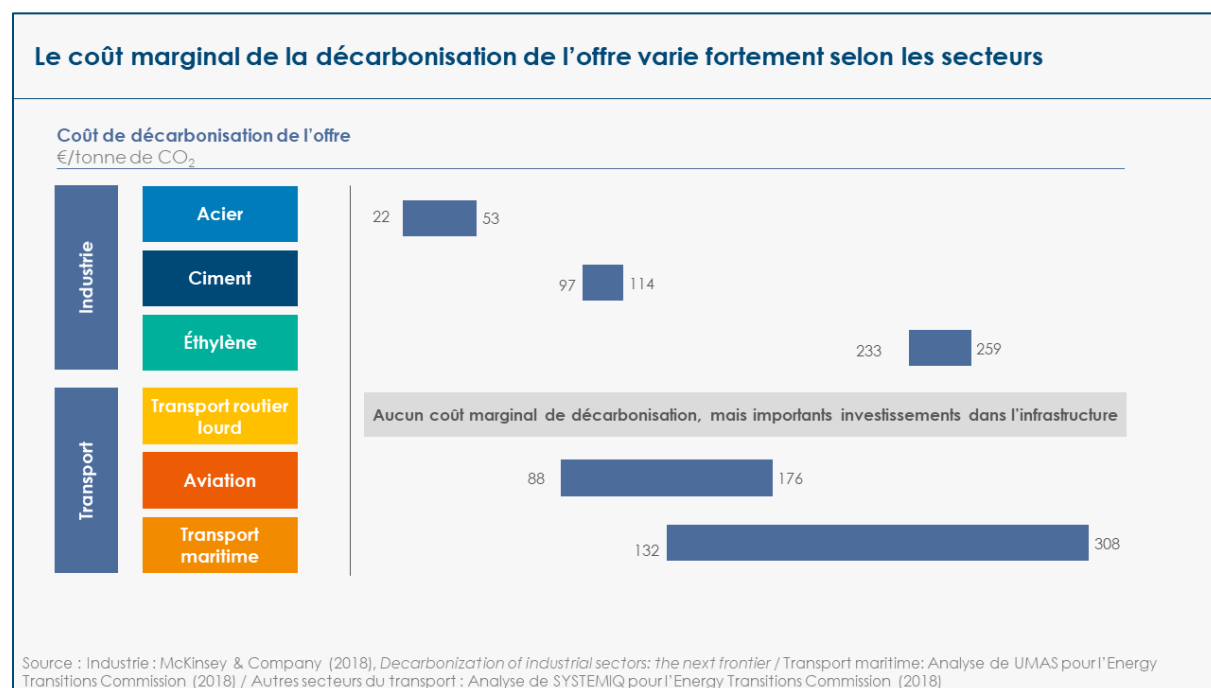


Figure 5

Néanmoins, même avec ces coûts et même si la demande augmente significativement (comme l'indiquent les scénarios de statu quo), le surcoût maximum d'une industrie lourde et d'un transport lourd décarbonisés ne représenterait que **0,5% du PIB mondial d'ici le milieu du siècle** [Figure 6]. Le surcoût dû à une économie « zéro-carbone » serait inférieur à 1% du PIB.

Ces coûts sont dominés par quatre secteurs. Dans l'industrie, la décarbonisation du **secteur de la cimenterie** sera relativement coûteuse du fait des émissions liées au procédé industriel, tout comme le sera celle du plastique, étant donné le besoin d'éliminer à la fois les émissions liées à la production et celles liées à la fin de vie du plastique. Dans les transports, la décarbonisation de **l'aviation et du transport maritime** sera également coûteuse, tandis que le passage à des camions électriques ou à piles à combustible à hydrogène n'entraînera vraisemblablement que des coûts minimaux, au vu de l'avantage inhérent des moteurs électriques en termes d'efficacité énergétique¹².

Ces coûts de décarbonisation pourraient être considérablement réduits par trois facteurs :

- **Une réduction des coûts de l'énergie renouvelable** : si l'électricité zéro-carbone était proposée à 17.5€/MWh dans le monde entier (au lieu de 35€/MWh), la décarbonisation de l'industrie lourde coûterait 25% de moins. De même, le coût de la

¹² Les BEV et les FCEV exigeront toutefois des investissements en infrastructures dont il sera question plus loin dans ce rapport.

décarbonisation des transports maritime et aérien serait 55% inférieur si le surcoût des biocarburants ou des carburants synthétiques pouvait être ramené à 0,26€ par litre (au lieu de 0,53€ par litre). Au total, une réduction du prix de l'énergie renouvelable pourrait faire baisser le coût total pour l'économie mondiale de 0,45% à 0,24% du PIB mondial.

- **Une meilleure gestion de la demande** : la généralisation du recyclage et de la réutilisation des matériaux dans une économie plus circulaire, combinée à une efficacité logistique optimisée et à des reports modaux dans le secteur des transports permettraient de réduire le coût de la décarbonisation des secteurs les plus difficiles à décarboniser de 40 à 45%, les faisant passer à 0,15 à 0,25% du PIB mondial.
- **Les développements technologiques futurs** : l'histoire nous enseigne que les effets de courbes d'apprentissage et d'économies d'échelle réduisent souvent davantage que prévu les prix des technologies, et que des technologies complètement nouvelles apparaissent, qui ne pouvaient être anticipées à l'avance. Ce phénomène pourrait fortement réduire, voire supprimer le coût de la décarbonisation. Par exemple, le coût de la décarbonisation du ciment pourrait être largement inférieur si les effets d'apprentissage et d'échelle faisaient baisser le coût de capture du carbone. De même, le coût de la décarbonisation de l'aviation et du transport maritime serait bien moindre si des améliorations dans la densité des batteries permettaient à l'électricité de jouer un plus grand rôle.

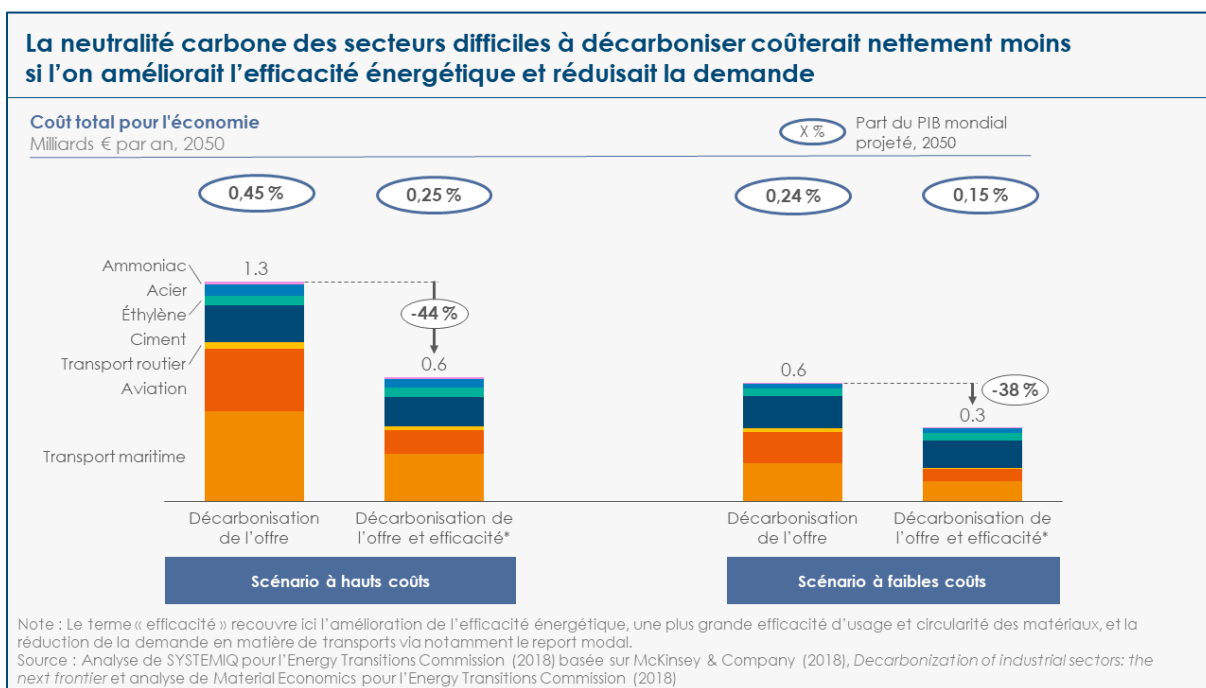


Figure 6

L'analyse des besoins d'investissement en capital vient confirmer que la **décarbonisation des secteurs les plus difficiles à décarboniser est réalisable à un coût abordable**.

- Dans les **secteurs industriels**, l'investissement en capital total entre 2015 et 2050 pourrait représenter 4,8 à 7,4 milliards d'euros¹³, soit près de 0,1 % du PIB agrégé sur cette période et moins de 0,5 % des flux internationaux d'épargne et d'investissements probables.

¹³ McKinsey and Company (2018), *Decarbonization of the industrial sectors: the next frontier*

- Dans le **transport routier**, les investissements nécessaires pour les infrastructures de recharge en électricité ou en hydrogène seraient **inférieurs à 5% de l'investissement habituel dans les infrastructures de transport**¹⁴.
- Dans les secteurs de **l'aviation et du transport maritime**, si la décarbonisation est réalisée avant tout via l'utilisation de carburants zéro-carbone dans les moteurs existants, **aucun investissement en capital supplémentaire majeur ne sera nécessaire**.

Les investissements dans les infrastructures et dans les capacités industrielles nécessaires pour parvenir à la neutralité carbone dans l'industrie lourde et les transports lourds sont donc très limités au regard de l'épargne et de l'investissement globaux. **Il n'y a aucune raison de croire qu'une pénurie de financement freinera le progrès vers la neutralité carbone dès lors que des mécanismes adéquats de financement sont mis en place.**

COÛT POUR LES CONSOMMATEURS FINAUX

L'impact de la décarbonisation sur les prix des produits de consommation sera différent d'un secteur à l'autre, mais sera, dans l'ensemble, limité [Figure 7]. La décarbonisation de l'acier n'ajoutera probablement pas plus de 160€ au prix d'une voiture, et l'utilisation de plastique zéro-émission augmentera le prix d'une bouteille d'un litre de soda de moins de 0.08€. **Le coût le plus sensible pour le consommateur final se verra dans le transport aérien** : si les biocarburants ou les carburants synthétiques continuent de coûter plus chers que le kérosène conventionnel, le prix des billets pour des vols internationaux zéro-carbone sera de 10 à 20% supérieur. Néanmoins, l'impact total sur les niveaux de vie devrait être limité dans la mesure où les dépenses dans le transport aérien international représentent moins de 3% de la consommation globale des ménages.

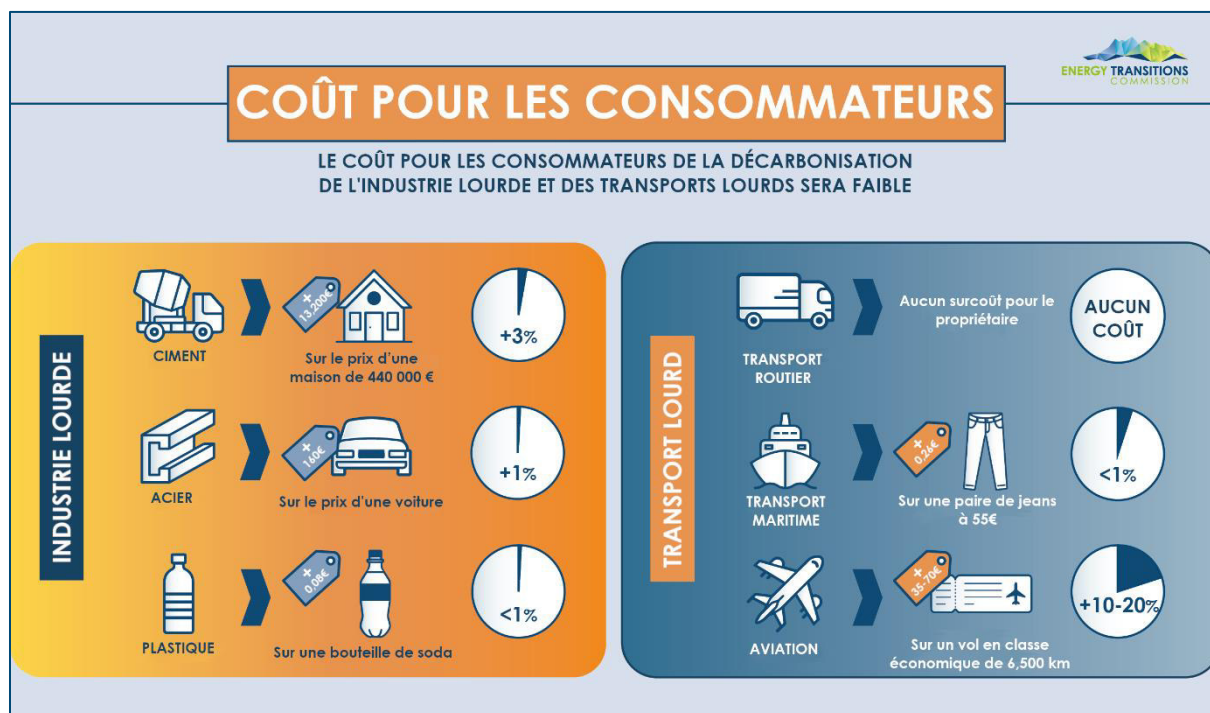


Figure 7

¹⁴ Agence européenne de l'environnement (2018)

COÛTS DES PRODUITS INTERMÉDIAIRES

Même si l'impact sur les prix des produits finaux est faible, la décarbonisation pourrait avoir d'importantes répercussions sur **les prix des produits intermédiaires**. Par exemple, l'acier zéro-carbone pourrait coûter 20% de plus par tonne que l'acier conventionnel. Cela pourrait freiner les investissements des entreprises dans les technologies de décarbonisation, en particulier si l'adoption des procédés de décarbonisation implique de fermer certains actifs avant la fin de leur durée de vie. De plus, dans le cadre des échanges internationaux de matériaux, l'imposition unilatérale de prix du carbone ou de nouvelles réglementations à l'échelle nationale ou régionale peut avoir des effets néfastes sur la compétitivité. Dans ce cas, des prix du carbone ou des réglementations appliqués au niveau international devraient être préférés [Figure 8].

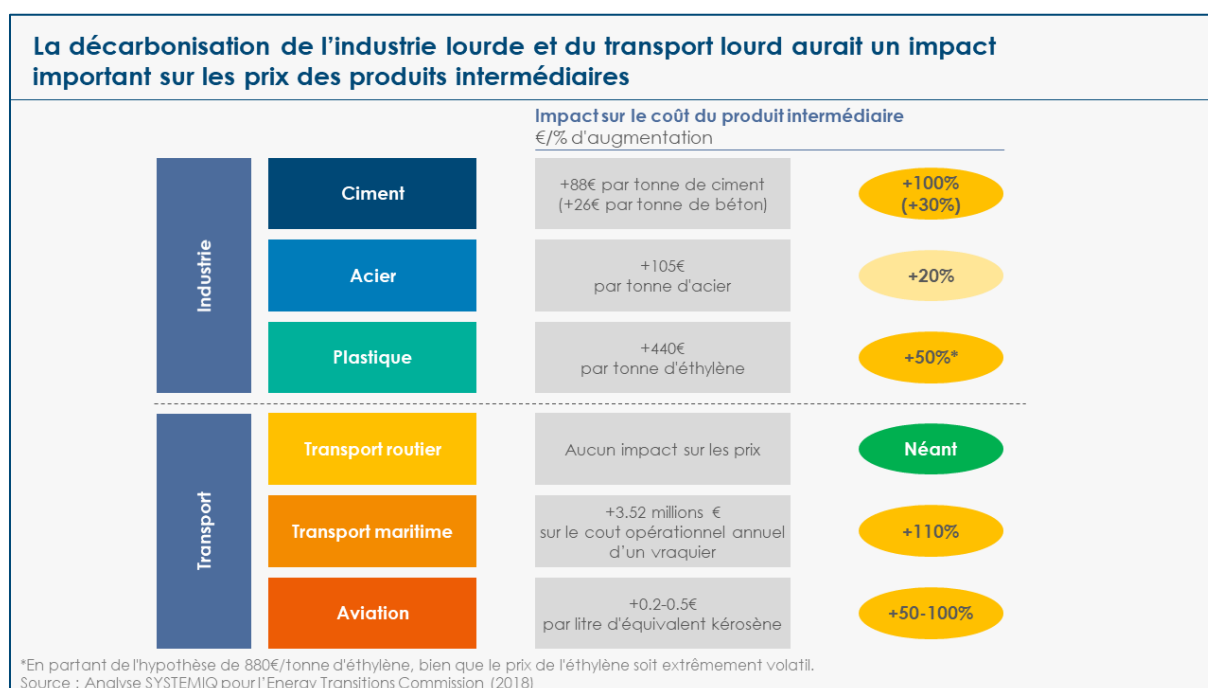


Figure 8

Implications pour les décideurs politiques :

- L'imposition de prix du carbone devraient avoir un impact très limité pour les consommateurs, mais ces prix doivent être soigneusement conçus pour éviter de possibles distorsions en matière de concurrence internationale.
- Les secteurs les plus difficiles à décarboner doivent bénéficier d'un soutien public à l'innovation et à l'investissement.
- Il est essentiel de promouvoir l'efficacité énergétique, l'efficacité de l'usage et la circularité des matériaux, ainsi que la gestion de la demande dans les transports, en parallèle des technologies de décarbonisation, afin de réduire le coût global de la décarbonisation pour l'économie.

UN PORTEFEUILLE DE TECHNOLOGIES DE DECARBONISATION

Il n'est ni possible ni nécessaire de définir par avance l'équilibre précis entre les quatre principaux moyens de décarboniser l'offre de matériaux et de transports lourds – électricité, bioénergie, capture du carbone et hydrogène. Ces technologies seront toutes nécessaires pour parvenir à la neutralité carbone nette dans les secteurs les plus difficiles à décarboniser.

L'équilibre optimal variera selon les régions en fonction de leur dotation en ressources naturelles (ressources en énergie solaire, hydraulique, éolienne ; ressources durables en biomasse ; disponibilité d'espaces de stockage souterrain du carbone) et évoluera dans le temps en fonction des évolutions, souvent imprévisibles, en matière de technologies et de coûts.

Les politiques publiques doivent donc s'attacher avant tout à créer de fortes incitations en faveur de la décarbonisation des secteurs les plus difficiles à décarboniser, tout en laissant aux marchés le soin de définir la voie la plus rentable pour progresser dans ce sens, secteur par secteur. Il est toutefois possible de **définir un certain nombre de quasi certitudes quant au chemin à suivre pour arriver à la neutralité carbone**, et d'en déduire des implications clés pour les politiques publiques et pour les priorités en matière d'investissement privé.

UN ROLE MAJEUR POUR L'HYDROGENE

Il est très vraisemblable que l'hydrogène jouera un rôle majeur dans la décarbonisation de plusieurs des secteurs les plus difficiles à décarboniser, et qu'il jouera également un rôle important pour le chauffage des bâtiments ainsi que pour la flexibilité du réseau électrique. Parvenir à une économie neutre en carbone nécessitera donc **une augmentation significative de la production mondiale d'hydrogène, de 60Mt par an aujourd'hui à approximativement 425-650Mt d'ici le milieu du siècle**, et ce même si les véhicules à piles à combustible à hydrogène ne jouent qu'un rôle très limité dans le secteur du transport léger.

Il est donc essentiel d'encourager la production à bas coût et à grande échelle de l'hydrogène zéro-carbone par l'une des trois voies suivantes :

- **L'électrolyse utilisant une électricité zéro-carbone** : cette solution sera de plus en plus rentable au fur et à mesure de la baisse simultanée des prix de l'électricité renouvelable et des coûts d'équipement pour l'électrolyse. Si la moitié de la future demande en hydrogène était couverte par l'électrolyse, le volume total de la production par électrolyse augmenterait de cent fois par rapport à aujourd'hui, créant un potentiel énorme de réduction des coûts grâce à des économies d'échelle et à des effets de courbes d'apprentissage.
- **L'application de la capture de carbone au reformage du méthane à la vapeur, puis le stockage ou l'utilisation du CO₂ capté (SMR+CCS)** : c'est peut-être l'une des formes de capture du carbone les plus rentables, étant donné la pureté du flux de CO₂ produit par la réaction chimique, à condition que la production de chaleur est électrifiée. Pour que l'hydrogène produit par la combinaison SMR+CCS soit quasi zéro-carbone, les fuites de carbones dans le procédé de capture ainsi que les fuites de méthane tout au long de la chaîne de valeur du gaz doivent être ramenées à un niveau minimal. Si la moitié de la future demande en hydrogène était couverte par la production par reformage du méthane avec capture de carbone sur la réaction chimique, les besoins en matière de stockage du carbone s'élèveraient à 2-3 Gt.
- **Le reformage du biométhane** : la production par SMR pourrait aussi être zéro-carbone si l'on utilisait du biogaz à la place du gaz naturel, mais il est peu vraisemblable que ce procédé joue un rôle important, au vu des autres usages prioritaires pour la biomasse, dont les ressources durables sont limitées.

Implications pour les décideurs politiques :

- La réduction des coûts d'électrolyse est une priorité essentielle en matière d'innovation, avec un objectif de coûts de capital réduits à 220€/kW.
- L'infrastructures pour le transport et le stockage du carbone doit être développée afin de permettre la production d'hydrogène quasi zéro-carbone par SMR+CCS.
- Une réduction supplémentaire des coûts des piles à combustible et des réservoirs d'hydrogène figure également au rang des priorités essentielles.
- Les échanges internationaux d'hydrogène ou d'ammoniac pourraient jouer un rôle important, nécessitant potentiellement des investissements lourds en infrastructures.

UNE ÉLECTRIFICATION MASSIVE ESSENTIELLE

Tous les scénarios pour une économie zéro-carbone impliquent que la part de l'électricité dans la demande d'énergie finale totale passe de 20% aujourd'hui à plus de 60% à l'horizon 2060.

En conséquence, la production totale mondiale d'électricité devra passer d'environ 20'000TWh aujourd'hui à 85-115'000TWh d'ici le milieu du siècle, tout en substituant les sources d'électricité à hautes émissions carbone par une production d'électricité zéro-carbone.

Des politiques volontaristes visant à améliorer l'efficacité énergétique, à augmenter l'efficacité de l'usage et la circularité des matériaux, et à gérer la demande de transports lourds permettraient de réduire ces besoins de 25%, voire plus dans les économies développées. Au vu de l'échelle des investissements considérés, il apparaît vital d'optimiser ces opportunités.

Une **expansion très rapide de l'électricité zéro-carbone restera néanmoins nécessaire.** Notre analyse laisse à penser que cette expansion, bien qu'ambitieuse, est techniquement et économiquement faisable :

- **L'électricité renouvelable est de plus en plus compétitive par rapport à l'électricité basée sur les énergies fossiles.** D'ici 15 ans, il sera possible de disposer de systèmes électriques dans lesquels 85 à 90 % de la demande en électricité sera satisfaite par un mix d'énergies éolienne et solaire, combiné à des batteries pour couvrir les fluctuations à court terme, et les 10 ou 15% restants seront couverts grâce à des capacités de génération immédiatement mobilisables pour des pics de production (par exemple, certaines centrales hydrauliques, ou des centrales utilisant de la biomasse ou des énergies fossiles avec capture de carbone). Une baisse importante du coût de l'électricité renouvelable et des batteries permettra de faire fonctionner de tels systèmes électriques à un coût total (pour la génération et la flexibilité) de 48€/MWh dans la plupart des régions, et inférieur à 31€/MWh dans les régions les plus favorables d'ici 2035¹⁵, en particulier si des structures de marché appropriées sont mises en place [Figure 9]. Ces coûts sont plus bas que les coûts actuels de l'électricité provenant de centrales gaz.
- **A l'échelle du globe, il existe suffisamment de terres disponibles pour supporter une production d'électricité renouvelable à l'échelle requise, avec cependant d'importantes variations régionales.** Dans les régions les plus favorables comme le nord-ouest de la Chine, le Midwest des États-Unis et le Moyen-Orient, l'électricité renouvelable pourrait être produite à faible coût en quantités supérieures à la demande locale. Mais les régions moins favorablement pourvues (présentant une densité de population plus élevée ou disposant de ressources renouvelables moins abondantes) pourraient être tenues de s'appuyer sur des sources d'électricité zéro-

¹⁵ Analyse de SYSTEMIQ pour l'Energy Transitions Commission (2018), adaptée de l'analyse de Climate Policy Initiative pour l'Energy Transitions Commission (2017), *Low-cost, low-carbon power systems*

carbone demandant moins de surface de terrain et aux facteurs de capacité supérieurs (par exemple le nucléaire ou les énergies fossiles avec capture de carbone) ou sur des importations d'électricité (via des lignes de transport longue distance ou sous la forme d'hydrogène ou d'ammoniac).

- **Le déploiement des énergies renouvelables doit être accéléré.** Pour répondre à cette demande d'électricité de 100'000TWh d'ici 2050 avec 90% d'électricité renouvelable, la vitesse de déploiement du solaire et de l'éolien devrait être augmentée de plus de 10% par an (c'est-à-dire doubler tous les 7 ans). Cela nécessitera également un renforcement des réseaux de distribution électrique.

Une électricité décarbonée sera vraisemblablement disponible dans la plupart des régions et pourrait atteindre moins de 30€/MWh dans les régions les plus favorables

Coût intégral maximal de la production d'électricité dans un système électrique quasi zéro-carbone d'ici 2035
€/MWh



Note : Basé sur le profil de génération et de consommation allemand / *Si seulement deux technologies de flexibilité sont disponibles : batteries lithium-ion et CCGT / Le coût de production de l'énergie renouvelable comprend toute l'énergie potentiellement produite, y compris la quantité restreinte ou stockée.
Source : Basé sur Climate Policy Initiative pour l'Energy Transitions Commission (2017), Systèmes électriques à faible coût et faible carbone

Figure 9

Si l'électrification se produisait avant la décarbonisation adéquate de l'électricité, avec une électricité encore produite pour l'essentiel à partir d'énergies fossiles, les émissions de CO₂ pourraient augmenter à court terme. Notre analyse suggère que, dans les économies développées, où l'intensité en carbone de l'électricité est inférieure à 750g de CO₂ par kWh, ce danger est limité, à la fois pour le transport de surface et dans la plupart des applications industrielles. Cependant, des intensités de carbone bien inférieures sont requises avant qu'un passage à l'hydrogène, à l'ammoniac et aux carburants synthétiques, ou au chauffage électrique ne réduise les émissions de carbone. En revanche, l'électrification immédiate dans certaines économies en développement dépendantes du charbon, par exemple l'Inde, où l'intensité carbone de l'électricité est supérieure à 1000g de CO₂ par kWh, pourrait entraîner une croissance importante des émissions de carbone. **Des progrès rapides en matière de décarbonisation de l'électricité sont donc essentiels, combinés à une coordination attentive du rythme de décarbonisation de l'électricité et de l'électrification.**

Implications pour les décideurs politiques :

- Les politiques de décarbonisation de l'électricité doivent anticiper des augmentations très significatives de la demande en électricité en accélérant le déploiement des sources d'électricité renouvelables.
- Les plans nationaux de décarbonisation, tels que décrits, par exemple, dans les Contributions Déterminées au niveau National (NDC) dans le cadre de l'Accord de Paris¹⁶, devraient définir une vision intégrée de la décarbonisation et de l'électrification, garantissant que la demande croissante d'électricité sera satisfaite par une électricité zéro-carbone.

UN USAGE PRIORISÉ ET TRÈS RÉGLEMENTÉ DE LA BIOMASSE

La biomasse, qu'elle soit utilisée comme source d'énergie pour la production de chaleur, comme agent de réduction dans la production d'acier ou encore comme matière première dans la production de produits chimiques, pourrait en principe jouer un rôle dans la décarbonisation de chacun des secteurs les plus difficiles à décarboniser. Lorsqu'elle est utilisée pour l'électricité, la chaleur ou l'industrie, elle pourrait être combinée avec la capture du carbone, et potentiellement engendrer des émissions négatives. Le bois pourrait également constituer un matériau alternatif de construction à faible carbone.

Mais **l'utilisation de la biomasse doit être contrainte au vu des limites quant à la disponibilité de biomasse réellement durable**, en particulier dues à la concurrence pour l'utilisation des sols. Ceci implique que la biomasse soit issue de sources ou de terrains qui ne peuvent être utilisés à des fins de production agroalimentaire ou de stockage naturel du carbone, et que son usage soit compatible avec la préservation de la biodiversité et les impératifs de conservation des écosystèmes, en particulier le combat contre la déforestation. De plus, la bioénergie produit typiquement moins de 1% de l'énergie produite par l'électricité solaire par hectare, ce qui rend les solutions basées sur l'électricité plus efficaces, lorsqu'elles sont disponibles et techniquement réalisables.

Les estimations du volume disponible de biomasse durable à l'échelle de la planète varient fortement, mais certaines hypothèses prudentes suggèrent qu'**au moins 70EJ par an de biomasse durable pour l'énergie et les matières premières pourraient être disponibles d'ici le milieu du siècle**, si l'on inclut 10 à 15EJ de déchets municipaux, 46 à 95EJ de déchets et de résidus de transformation de l'agriculture et 15 à 30EJ de résidus de la gestion forestière¹⁷. Cette estimation exclut la production de biomasse par des cultures dédiées à la bioénergie, que ce soit sous la forme de plantes oléagineuses (par exemple, le soja) ou de cultures forestières (par exemple, le saule à croissance rapide ou le peuplier).

Les principales incertitudes tiennent à l'offre de matériaux lignocellulosiques, qui pourraient être récoltés de manière durable à partir de cultures forestières (par le biais d'un programme de reforestation de grande ampleur, concentré sur les terres dégradées dans les pays tropicaux), ainsi qu'à la disponibilité de cultures couvre-sol durant l'hiver dans les zones tempérées et de produits à base d'algues. Plusieurs facteurs pourraient réduire la quantité de biomasse durable disponible, en particulier de moindres rendements des cultures dus aux changements climatiques.

Une offre durable de 70 EJ (ou même de 100 EJ) ne suffirait pas à satisfaire l'ensemble des revendications sectorielles potentielles sur la biomasse émanant des secteurs de l'énergie, de l'industrie et des transports. **Son usage doit donc être concentré sur des secteurs où il y a peu ou pas de voies de décarbonisation alternatives :**

¹⁶ Ou dans les Plan Nationaux Energie-Climat (NECPs) des Etats membres de l'Union Européenne

¹⁷ Agence Internationale de l'Energie (2017), *Technology roadmap: Delivering Sustainable Bioenergy*

- **Le principal secteur prioritaire semble être l'aviation**, où un équivalent zéro-carbone du kérosène est essentiel pour décarboniser les vols long courrier. Un maximum de 42EJ de biomasse serait nécessaire pour une décarbonisation complète du secteur. Ce niveau pourrait être abaissé si des carburants synthétiques étaient utilisés, ainsi que par l'optimisation de l'efficacité énergétique et la gestion de la demande.
- **Le second secteur prioritaire est probablement celui des plastiques**, pour lequel une matière première biologique est nécessaire pour compenser les émissions en fin de vie, à moins que le plastique en fin de vie ne soit recyclé ou enfoui de manière sûre. La matière première issue de la biomasse ne pourrait se substituer entièrement aux énergies fossiles pour la production de plastique : 28EJ de biomasse seraient nécessaires pour couvrir seulement 30% des besoins en matières premières. La stratégie de décarbonisation des plastiques doit donc combiner une transition aussi complète que possible vers un modèle circulaire, avec le stockage du carbone (sous la forme de plastiques solides placés dans des espaces de stockage permanent, sûrs et étanches), et une utilisation aussi limitée que possible des matières premières biologiques pour compenser les inévitables pertes dans la chaîne de valorisation.
- Si elles ne sont pas limitées par des critères stricts de durabilité, **les plus fortes demandes de biomasse** pourraient toutefois émerger, non des secteurs les plus difficiles à décarboniser envisagés dans ce rapport, mais du **chauffage des bâtiments et de la production d'électricité** (où l'usage de biomasse pourrait éventuellement donner lieu à des émissions négatives si elle était combinée à la capture et au stockage du carbone)¹⁸. Il est donc essentiel de limiter ce besoin, en facilitant au maximum les progrès dans les technologies de stockage de l'énergie et la gestion intelligente de la demande.
- Par contraste, **les biocarburants et la biomasse ne sont pas essentiels pour décarboniser le transport routier lourd, le transport maritime et d'autres secteurs industriels**, où il existe d'autres voies de décarbonisation.

La biomasse, le biogaz et les biocombustibles ont de fortes chances d'être plus chers que les énergies fossiles. La mise en place d'un prix du carbone et des réglementations ciblées seront donc essentielles et appropriées afin de les rendre compétitifs. Les solutions fondées sur la biomasse pourraient dans certains cas être plus onéreuses que des voies alternatives de décarbonisation, comme l'électrification ou l'utilisation d'hydrogène ; elles seraient alors naturellement exclues du marché.

Implications pour les décideurs politiques :

- Des réglementations strictes sur le caractère durable de la biomasse sont essentielles. Elles excluront vraisemblablement la plupart des cultures énergétiques qui entrent en compétition avec l'agriculture et la protection des écosystèmes, avec des exceptions comme les cultures couvre-sol hivernales dans les climats tempérés.
- Le développement et la réduction du coût d'un biokérosène réellement durable pour le transport aérien et de matières premières biologiques pour l'industrie plastique est une priorité majeure en matière d'innovation.
- L'utilisation de la biomasse dans des secteurs non prioritaires comme le transport routier ne doit pas être encouragée.
- Le soutien public au développement de la biomasse doit se retirer progressivement des secteurs non prioritaires, excepté lorsque les conditions locales sont favorables à

¹⁸ Le scénario illustratif de l'ETC suggère des besoins de 28EJ de biomasse si le biogaz joue un rôle important dans le chauffage résidentiel, et jusqu'à 34EJ si la production basée sur la biomasse fournit seulement 4 % de l'offre globale d'électricité pour permettre de répondre aux pics des besoins de production.

la production de biomasse véritablement durable pour un large portefeuille d'applications.

- Il est essentiel de développer les capacités de génération de chaleur et les capacités de génération électrique immédiatement mobilisables pour répondre aux pics des besoins de production qui ne reposent pas sur la biomasse, ainsi que les technologies de stockage de l'énergie.
- L'amélioration de l'efficacité du processus de bio-raffinage est essentielle pour permettre une plus grande utilisation des bioénergies et des matières premières biologiques pour un niveau donné de ressources en biomasse primaire.

LE RÔLE ESSENTIEL, BIEN QUE LIMITÉ, DE LA CAPTURE DU CARBONE

Les fortes baisses enregistrées ces dix dernières années dans le coût des énergies renouvelables signifient que la capture du carbone est **susceptible de jouer un rôle relativement faible dans le secteur de la production électrique**, fournissant potentiellement une source d'électricité flexible à faible intensité carbone afin de compléter l'offre d'électricité renouvelable plus variable. Mais il sera impossible, et certainement plus cher, de parvenir à la neutralité carbone dans les secteurs industriels les plus difficiles à décarboniser sans utiliser la capture et le stockage du carbone. Ainsi, la capture du carbone constituera vraisemblablement **la seule voie pour parvenir à une décarbonisation totale de la production de ciment**, à moins qu'une innovation radicale dans la chimie du ciment parvienne à éliminer les émissions de procédés. Dans certains endroits, la capture du carbone sera aussi probablement la voie la plus rentable vers la décarbonisation de la sidérurgie, de l'industrie des produits chimiques et de la production d'hydrogène.

Il n'existe actuellement **aucun consensus sur l'échelle nécessaire de la capture du carbone** au niveau global. Plusieurs scénarios pour atteindre les objectifs de l'accord sur le climat de Paris partent de l'hypothèse que, d'ici 2100, la capture et le stockage du carbone pourraient représenter 18Gt par an de réductions d'émissions (voire plus) et générer des émissions négatives en étant appliqués aux procédés basés sur la biomasse. Certains s'inquiètent que ces hypothèses de gros volumes ne soient utilisées pour justifier la poursuite de l'utilisation à grande échelle de combustibles fossiles. De plus, on entend parfois s'exprimer la crainte qu'un stockage souterrain du carbone n'est ni sûr ni efficace sur la durée.

Il est essentiel de parvenir à une forme de consensus sur le rôle réaliste et nécessaire de la capture du carbone, ainsi que sur les rôles respectifs du stockage et de l'utilisation du carbone dans des produits à base de CO₂. L'opinion de l'ETC est la suivante :

- Il est possible de développer une économie zéro-émissions-carbone sans recourir à de très grandes quantités de capture de carbone (18Gt par an) considérées dans certains modèles. Cependant, une **échelle de capture plus modeste** (aux alentours de 5 à 8Gt par an) a de fortes chances d'être une composante indispensable et rentable d'une stratégie globale de décarbonisation.
- **1 à 2Gt du CO₂ capté chaque année pourraient alors probablement être utilisés dans des produits à base de CO₂ qui permettent un stockage de longue durée**, les plus fortes opportunités se situant dans les secteurs du béton, des agrégats et de la fibre de carbone. Cela implique une potentielle synergie entre la capture du carbone dans les cimenteries et son utilisation dans la production de béton.
- **Le stockage du carbone sera toutefois vraisemblablement nécessaire**, à hauteur de 3 à 7Gt de CO₂ par an. Des avis d'experts, y compris du GIEC, suggèrent que le stockage du carbone peut être sûr et sécurisé de manière adéquate, à condition qu'il soit réglementé efficacement¹⁹.
- **Atteindre ces volumes de capture de carbone d'ici le milieu du siècle demandera un changement important dans le rythme de déploiement des installations de capture**

¹⁹ IPCC (2005), *Carbon Dioxide Capture and Storage*; IPCC (2014), *Mitigation of climate change*

du carbone, qui ne se produira pas si les gouvernements ne jouent un pas rôle actif dans (i) un renforcement de l'acceptation sociale du transport et du stockage du carbone, sur la base de preuves scientifiques indépendantes concernant leur sécurité, (ii) une tarification du carbone rendant la capture et le stockage du carbone économiquement viables, et (iii) la planification et la régulation du déploiement des infrastructures de transport et de stockage de carbone. Ces conditions ne sont pas encore réunies aujourd'hui. Une action collective immédiate et énergique, de la part des décideurs politiques et des industriels, est nécessaire pour les réunir dans les dix prochaines années.

Implications pour les décideurs politiques :

- Les technologies de capture et d'utilisation du carbone à l'échelle industrielle, en particulier dans la chaîne de valorisation ciment-béton, devraient être une priorité essentielle en matière d'innovation.
- Le prix du carbone sera essentiel pour soutenir toute forme de capture et de stockage.
- Pour que le stockage souterrain du carbone fasse partie du portfolio de solutions de décarbonisation, les gouvernements doivent :
 - Réglementer le transport et le stockage du carbone de manière suffisamment stricte pour garantir leur acceptation par la société ;
 - Planifier et soutenir le déploiement des infrastructures de transport et de stockage du carbone.
- Si le stockage souterrain du carbone n'était pas développé, les gouvernements devraient :
 - Envisager le déploiement encore plus rapide des énergies renouvelables et des solutions industrielles basées sur l'électricité ;
 - Accélérer le développement et la commercialisation de matériaux à faible carbone pouvant se substituer au ciment ;
 - Développer les technologies de destruction du dioxyde de carbone, pour traiter les émissions de carbone restantes.

LA VOIE OPTIMALE VERS UNE ÉCONOMIE ZÉRO-CARBONE

La voie optimale vers une économie zéro-carbone nécessitera l'usage de tous les leviers de décarbonisation. **L'électrification aura le rôle dominant : elle représentera près de 65% de la demande énergétique finale d'ici le milieu du siècle et sera également utilisée pour produire une part importante de l'hydrogène.** Près de 85 à 90% de l'électricité proviendront des énergies renouvelables ou d'autres sources zéro-carbone, avec au maximum 10 à 15% d'électricité issue de la biomasse ou des énergies fossiles avec capture de carbone. La demande en énergie primaire serait nettement plus faible si l'on poursuivait les opportunités d'accroître l'efficacité énergétique, l'efficacité de l'usage et la circularité des matériaux, ainsi que de limiter la croissance de la demande dans les transports lourds. [Figure 10]

L'électricité issue de sources renouvelables ou d'origine nucléaire pourrait représenter ~60% de la demande en énergie primaire au milieu de siècle

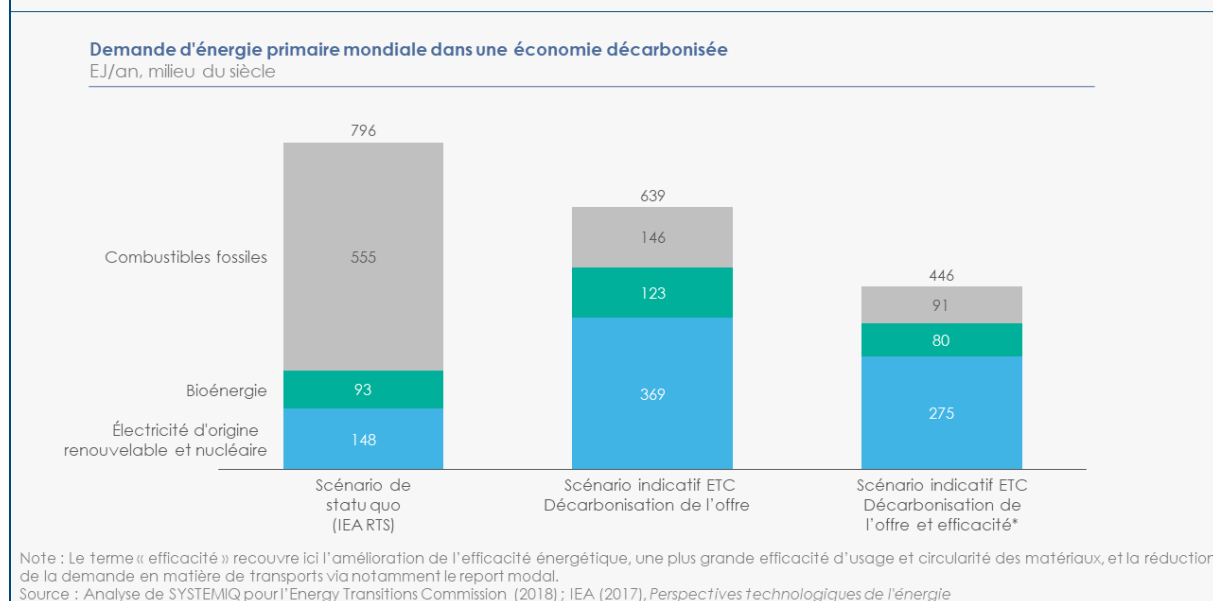


Figure 10

La voie optimale de décarbonisation sera cependant différente selon les régions, au vu des larges variations en termes de dotations en ressources naturelles :

- **Les grandes variations régionales en ressources solaires et éoliennes** signifient que, alors que certains pays pourraient satisfaire bien plus de 65% de la demande finale en énergie à partir d'une électricité renouvelable peu coûteuse produite sur place, d'autres devront compter sur des sources d'électricité zéro-carbone ou sur des importations d'électricité. Le coût de l'électricité renouvelable sera également très différent.
- **Les ressources de biomasse par habitant et son coût varient également fortement selon les régions**, ce qui suscitera vraisemblablement des échanges internationaux de produits biologiques raffinés pour le transport aérien et pour l'industrie des plastiques, et des niveaux d'utilisation de la biomasse très différents selon les régions dans d'autres secteurs (localisés) de l'économie, tels que la production de chaleur et d'électricité.
- **Pour ce qui est du stockage souterrain du carbone, les très fortes variations régionales dans l'échelle connue de la capacité de stockage** reflètent en partie les limites des connaissances actuelles dans plusieurs régions du monde (en particulier en Afrique). Mais une fois accomplies, les études exhaustives futures révéleront probablement une forte variation des capacités de stockage d'une région à l'autre.

B. VERS LA NEUTRALITÉ CARBONE : GÉRER LA TRANSITION VERS DES INDUSTRIES ET DES TRANSPORTS SANS ÉMISSIONS

Notre analyse montre que tous les secteurs les plus difficiles à décarboniser pourraient atteindre la neutralité carbone d'ici le milieu du siècle, à un faible coût pour l'économie mondiale et pour le consommateur final. Mais la trajectoire vers la neutralité carbone est tout aussi importante que l'objectif final. Il est donc essentiel de :

- **Identifier les difficultés qui peuvent contraindre le rythme de la transition ;**
- **Réduire l'échelle des investissements nécessaires dans les technologies de décarbonisation**, par l'amélioration de l'efficacité énergétique et la gestion de la demande ;
- **Déterminer le rôle approprié des solutions transitoires**, notamment le gaz comme combustible de transition et les achats de compensation carbone comme stratégie de décarbonisation provisoire.

DEFIS TECHNIQUES, ECONOMIQUES ET INSTITUTIONNELS PAR SECTEUR

La transition vers une économie zéro-carbone fait face à trois catégories de défis : les défis techniques, économiques et institutionnels.

DÉFIS TECHNIQUES :

- **Nombre des technologies nécessaires ne sont pas encore commercialisées.** Si les camions électriques peuvent s'avérer rentables à l'horizon 2030, l'électrification des fours de cimenterie pourrait ne pas être prête commercialement avant 2040. Les procédés industriels basés sur l'hydrogène demandent encore un développement technologique important. **L'accélération du développement et du déploiement à grande échelle des technologies de décarbonisation essentielles sont donc cruciaux.**
- **Parvenir à la neutralité carbone sur le cycle de vie des matières plastiques représente un défi de taille**, car cela suppose d'éliminer non seulement les émissions lors de la production, mais aussi les émissions en fin de vie. Au vu des ressources limitées en biomasse durable, il ne sera pas possible de remplacer entièrement les combustibles fossiles par une matière première d'origine biologique. Il sera donc essentiel de gérer le stock de plastiques à base de combustibles fossiles existant et futur **via le recyclage mécanique et chimique et via un stockage sécurisé des plastiques solides en fin de vie.**
- Dans la plupart des cas, **les technologies de capture de carbone permettront de capter environ 80 à 90% du flux de CO₂, les 10 à 20% restants étant encore rejetés dans l'atmosphère.** Un certain niveau d'émissions négatives provenant la gestion des sols sera donc nécessaire pour compenser ces émissions résiduelles du système énergétique et industriel.

DÉFIS ÉCONOMIQUES :

- Étant donné que la plupart des voies de décarbonisation impliquent un surcoût, **les forces du marché à elles seules ne suffiront pas à impulser le progrès** ; des politiques fortes, combinant réglementation et soutien, devront mettre en place des incitations pour une décarbonisation rapide.
- Il est particulièrement difficile de **créer des incitations financières fortes** encourageant la recherche de solutions de décarbonisation optimales **sans imposer des contraintes disproportionnées** aux secteurs dans lesquels les technologies zéro-carbone ne sont pas encore disponibles.

- **Dans l'industrie lourde, la très longue durée de vie des sites de production retardera le déploiement de nouvelles technologies**, à moins de mettre en place des politiques encourageant les remplacements précoces d'actifs. Dans la sidérurgie, par exemple, la transition de la réduction en hauts-fourneaux à une réduction directe par l'hydrogène pourra nécessiter la fermeture d'usines existantes avant la fin de leur durée de vie utile.
- **Des investissements initiaux élevés pourraient constituer un obstacle au progrès**, même si les prix du carbone rendent les technologies zéro-carbone en théorie rentables, notamment dans des entreprises ou dans des secteurs à faibles marges. Un soutien public à l'investissement des entreprises pourrait donc être requis, par exemple par le biais de garanties de prêt ou d'avances remboursables.
- Bien que bénéfique à une échelle globale, **le passage à une économie zéro-carbone créera inévitablement des gagnants et des perdants**, en impactant le développement économique local et l'emploi dans certaines régions. Les décisions politiques devront anticiper et compenser ces effets de répartition par des stratégies de transition justes.

DÉFIS INSTITUTIONNELS :

- **Les systèmes actuels d'innovation sont mal connectés**, avec une faible coordination entre les R&D publiques et privées, et un manque de forums internationaux pour porter un programme d'innovations centré sur les secteurs difficiles à décarboner.
- **Dans les secteurs exposés à la concurrence internationale, des prix ou réglementations sur le carbone appliqués à l'échelle nationale pourraient impacter négativement la compétitivité et provoquer des délocalisations des sites de production**. Il est donc nécessaire d'assurer une coordination politique au plan international, ou bien d'utiliser des taxes en aval (sur les produits de consommation, où qu'ils aient été produits), des ajustements fiscaux aux frontières, des allocations libres au sein de système d'échanges de quotas d'émissions ou des compensations (combinées avec des normes technologiques de références de plus en plus ambitieuses).
- **Certaines industries, comme le transport maritime ou la construction, sont si fragmentées** que les mécanismes incitatifs n'ont pas nécessairement d'impact sur des acteurs aux intérêts différents. Même les technologies d'efficacité énergétique et les pratiques circulaires, en théorie rentables, n'y sont pas faciles à déployer. Une politique innovante doit renforcer les incitations, par exemple les réglementations imposées au niveau des ports ou les obligations de recyclage des matériaux.

IMPLICATIONS POUR L'INDUSTRIE ET POUR LE TRANSPORT LOURD

Face à ces barrières techniques, économiques et institutionnelles, le processus de transition variera énormément selon les secteurs :

- **Dans les secteurs industriels, atteindre une décarbonisation complète prendra inévitablement plusieurs décennies**. Les politiques publiques doivent donc de forts dispositifs incitatifs, établis très en avance pour donner un signal de long terme, que ce soit par le biais d'une tarification carbone, de réglementations ou d'aides financières. Une action proactive de la part des industries durant la prochaine décennie permettra de réduire les coûts des efforts de décarbonisation successifs.
- Dans le **secteur des transports lourds**, les processus de transition sont moins complexes :
 - Dans le **transport routier lourd**, des durées de vie d'actifs largement plus courtes pourraient permettre une décarbonisation rapide des flottes de camions et de bus (par exemple sur 15 ans au lieu de 30), dès lors que des

véhicules alternatifs (électriques à batteries ou à pile à combustible à hydrogène) seront compétitifs à l'achat.

- Dans les **transports maritimes et aériens de longue distance**, le fait qu'une décarbonisation totale implique probablement l'usage de carburants zéro-carbone dans les moteurs existants signifie que la longévité des moteurs des bateaux et des avions n'est pas un facteur contraignant du rythme de la transition, qui sera plutôt déterminé par les coûts relatifs des carburants zéro-carbone et des carburants conventionnels.

REDUIRE L'ECHELLE DES INVESTISSEMENTS NECESSAIRES PAR L'AMELIORATION DE L'EFFICACITE ENERGETIQUE ET PAR LA GESTION DE LA DEMANDE

Au vu du temps nécessaire pour parvenir à une décarbonisation complète côté offre, en particulier dans l'industrie, **améliorer l'efficacité énergétique et réduire la demande est essentiel**, non seulement pour assurer la réduction des émissions à court terme, mais aussi pour faire baisser le coût de la décarbonisation à long terme en réduisant le volume de la production industrielle primaire ou des services de mobilité auquel les technologies de décarbonisation devront être appliquées [Figure 11].

Améliorer l'efficacité énergétique sera particulièrement important dans le transport maritime et aérien, où une moindre consommation de carburant par kilomètre pourrait réduire le surcoût lié à l'utilisation des carburants zéro-carbone et réduire la demande pour des biocarburants dont l'offre totale sera limitée.

Le potentiel de **gestion de la demande** diffère entre les secteurs du transport et de l'industries:

- Dans les secteurs des transports lourds, **le plus fort potentiel de réduction de la demande réside dans le report modal** de la route au rail pour les marchandises, et de l'avion au rail à grande vitesse pour les transports de passagers sur courte distance, mais le potentiel de réduction des émissions carbone est peu susceptible d'excéder 20%.
- **Dans l'industrie en revanche, un usage plus efficace et une plus grande circularité des matériaux pourrait réduire les émissions de CO₂ de 40% en moyenne dans le monde**, et de plus de 55% dans les économies développées à l'horizon 2050, les plus grandes opportunités se trouvant dans les chaînes de valeur des plastiques et des métaux.

La plupart des technologies requises pour réaliser ce potentiel sont d'ores et déjà disponibles. Leur déploiement à l'échelle requise entraînera vraisemblablement des réductions de coût, par exemple, dans les industries de recyclage. Mais des **changements majeurs en matière de conception des produits, de pratiques industrielles et de réglementations** seront essentiels pour saisir cette opportunité.

- **Une meilleure circularité des matériaux ne pourra être obtenue sans une plus forte coordination entre les différentes entreprises le long des chaînes de valeur manufacturière, automobile et de la construction.** Un recyclage de haute qualité nécessite de nouvelles pratiques en matière de conception de produit, de démantèlement en fin de vie et de séparation des matériaux, qui ne se produiront pas à moins qu'elles ne soient rendues obligatoires par la réglementation, notamment grâce à l'extension de la responsabilisation des producteurs.
- **Une meilleure efficacité logistique dépendra également d'une meilleure coordination entre les entreprises**, facilitée par l'informatisation des mégadonnées (*big data*), tandis que les reports modaux nécessiteront d'améliorer les infrastructures de transport

public, en particulier ferroviaires, et de créer des incitations financières au changement, que ce soit pour les passagers ou pour le fret.

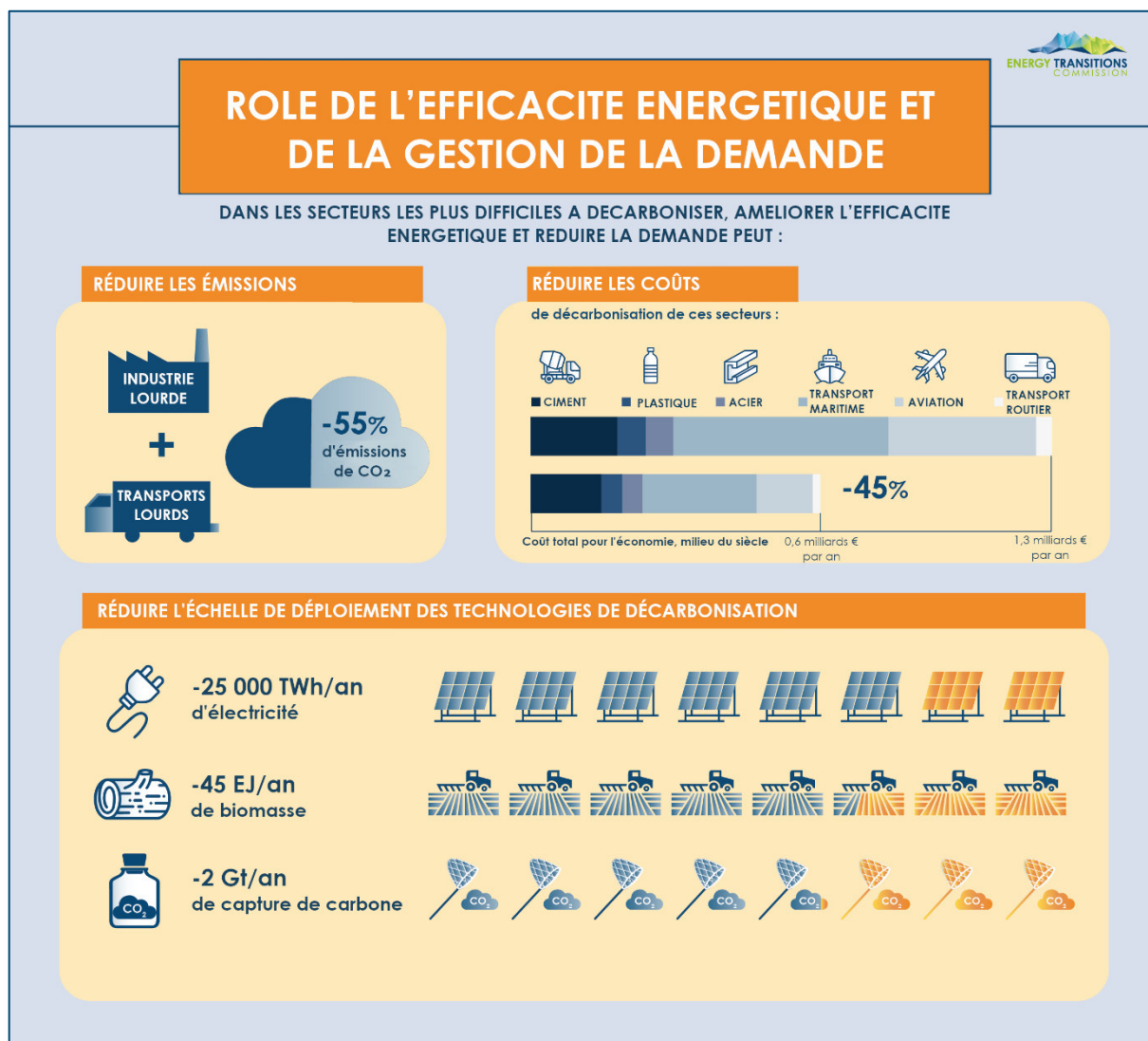


Figure 11

UTILISER LES SOLUTIONS TRANSITOIRES : LE GAZ ET LES COMPENSATIONS CARBONE

L'utilisation adéquate des solutions transitoires variera selon les secteurs en fonction de l'horizon auquel les solutions de décarbonisation totale seront commercialement disponibles. Les solutions transitoires apparaissent donc particulièrement appropriées dans **l'industrie lourde**, où de nombreuses solutions zéro-carbone ne sont pas encore commercialisées. Elles sont en revanche susceptibles de jouer **un rôle moins important dans les transports**, au vu de la facilité relative du passage à des véhicules électriques (dans le secteur du transport routier) ou à des biocarburants et à des carburants de synthèse (dans les transports maritime et aérien).

LE GAZ COMME CARBURANT DE TRANSITION

La combustion du gaz produisant typiquement environ **50% d'émissions en moins que le charbon** (à condition que les émissions de méthane soient strictement contrôlées), le passage du charbon au gaz dans des procédés/équipements par ailleurs en grande partie inchangés pourrait en principe permettre des réductions significatives d'émissions à court terme. **Passer du pétrole au gaz engendrerait des réductions plus limitées (5 à 20%)**. Toutefois, les avantages pour le climat peuvent être grandement réduits, voire disparaître, si les fuites de méthane dans la chaîne de valorisation du gaz sont supérieures à 1 à 3% (en fonction des applications).

- **Dans l'industrie, il existe un potentiel important de substitution du charbon par le gaz** dans les industries qui utilisent encore le charbon comme source de chaleur (par exemple la cimenterie) et dans des pays où le charbon est encore utilisé comme matière première pour la production de produits chimiques (en particulier en Chine). Ce potentiel pourrait toutefois être limité par le fait que les réserves de gaz locales sont parfois limitées, notamment en Chine et en Inde.
- **Dans le secteur des transports, le rôle optimal du gaz est plus limité.** Il pourrait y avoir un rôle transitoire limité pour le GNC dans le transport routier et pour le GNL dans le transport maritime, si ces technologies peuvent être utilisées dès maintenant sur les véhicules existants et remplacées par des véhicules électriques et par des carburants à zéro-carbone dans les 10 à 15 prochaines années.

La trajectoire optimale vers la neutralité carbone comportera probablement une production mondiale de gaz constante ou en légère augmentation d'ici 2040, à condition que :

- **Des mesures politiques fortes s'assurent que les fuites de méthane (issues du torchage, de l'évacuation ou des fuites de gaz) sur l'intégralité de la chaîne de production et d'utilisation atteignent des niveaux suffisamment bas** (0,2% pour les fuites en amont et moins de 1% lorsqu'on considère les émissions en amont, durant le transport et en aval de la chaîne de valeur) avant tout développement de l'utilisation du gaz.
- Des stratégies annoncées à l'avance s'assurent que les secteurs qui utilisent le gaz puissent dès que possible :
 - **Passer au biogaz** – tout en prenant en compte les contraintes pesant sur la disponibilité d'une biomasse durable, qui pousseront les prix à la hausse ;
 - **Appliquer la capture et le stockage du carbone** aux centrales au gaz existantes ;
 - **Passer du gaz naturel à l'électricité ou à l'hydrogène**, ce qui implique la nécessité de planifier à l'avance soit la fermeture des infrastructures et des équipements au gaz avant la fin de leur durée de vie utile, soit leur requalification en faveur de l'hydrogène.

Il est donc clair que **la consommation de gaz non décarboné doit décroître rapidement après 2040** afin d'être compatible avec l'Accord de Paris.

LE RÔLE ADÉQUAT DES COMPENSATIONS CARBONE

Dans la mesure où le coût marginal de la décarbonisation varie fortement d'un secteur à l'autre, **les premières étapes des trajectoires sectorielles vers la neutralité carbone pourraient inclure l'achat de compensations carbone auprès d'autres secteurs de l'économie ou auprès du secteur de l'agriculture, la gestion forestière et la gestion des sols**²⁰. Ces programmes (parfois appelés « mesures axées sur le marché ») inciteront également à rechercher des solutions de décarbonisation à plus long terme, en attribuant aux différents secteurs un prix marginal du carbone.

²⁰ Les contentieux juridiques portant sur la manière de comptabiliser les réductions d'émissions de carbone résultant des compensations carbone qui sont échangées au plan international en-dehors des programmes réglementés d'échanges d'émissions ne sont pas traités dans ce rapport.



De plus, l'achat de compensations carbone auprès du secteur de la gestion forestière pourrait constituer une intéressante source de financement pour soutenir l'investissement dans une utilisation plus durable des sols, par exemple en empêchant la déforestation et en facilitant la reforestation.

Mais toute dépendance envers des achats de compensations carbone doit être strictement contrôlée et clairement limitée dans le temps :

- **Les compensations achetées auprès d'autres secteurs consommateurs d'énergie ne doivent intervenir que dans le cadre des systèmes d'échanges de quotas d'émissions, dont les volumes totaux sont strictement encadrés et diminuent à un rythme compatible avec les objectifs de l'Accord de Paris sur le climat.** Cela implique que d'ici le milieu du siècle, il n'existera plus aucun potentiel d'achats de ce type.
- Les compensations carbone ne devraient également dans l'idéal jouer qu'un rôle transitoire, **au vu des limites à la croissance du stockage naturel du carbone à l'échelle planétaire.** Elles doivent également faire l'objet d'une réglementation extrêmement encadrée pour veiller à ce que l'achat de compensations débouche réellement sur des réductions additionnelles des émissions de carbone, et pour éviter les effets négatifs sur la biodiversité.

Cependant, notre analyse suggère que, si les systèmes énergétiques et industriels peuvent se rapprocher de la neutralité carbone à l'horizon 2060, il pourrait exister des émissions résiduelles limitées (de l'ordre de 2Gt par an), dont l'élimination coûterait très cher. Un niveau limité d'émissions négatives provenant de l'utilisation des terres pourrait donc continuer d'être nécessaire à long terme.

Mais, étant donné la contrainte de parvenir à des émissions négatives à long terme, les stratégies sectorielles ne peuvent prétendre être compatibles avec l'Accord de Paris sur le climat que si elles ont pour objectif d'être aussi proches que possible de la neutralité carbone dans le secteur lui-même d'ici le milieu du siècle.

C. ACTIONS : CE QUE LES DÉCIDEURS POLITIQUES, LES INVESTISSEURS, LES ENTREPRISES ET LES CONSOMMATEURS PEUVENT (ET DEVRAIENT) FAIRE

LE RÔLE DE L'INNOVATION

La décarbonisation totale de tous les secteurs de l'industrie lourde et du transport lourd **pourrait être assurée grâce à des technologies qui sont déjà en cours de développement**. Mais nombre d'entre elles ne sont pas encore prêtes à être commercialisées et n'ont encore été déployées à une échelle industrielle. De plus, **des innovations technologiques encore insoupçonnées** ouvriront très certainement des trajectoires de décarbonisation différentes et moins chères durant les prochaines décennies. L'investissement privé et le soutien public sont tous deux nécessaires pour accélérer le développement d'innovations déjà à l'étude et pour accroître la probabilité d'innovations plus radicales.

INDUSTRIE PERMETTRE UNE MEILLEURE EFFICACITE ET PLUS GRANDE CIRCULARITE DANS L'USAGE DES MATERIAUX

Réaliser le potentiel de réduction des émissions de carbone offert par l'efficacité énergétique, ainsi que par l'efficacité et la circularité de l'usage des matériaux exigera des innovations dans trois domaines essentiels :

- La **conception des produits**, pour permettre :
 - Une meilleure efficacité énergétique – par exemple une meilleure conception aérodynamique des fuselages d'avions et des navires ;
 - L'utilisation de nouveaux combustibles à faibles émissions de carbone – par exemple une nouvelle conception radicalement différente des fuselages, pour permettre l'utilisation de l'hydrogène dans l'aviation ;
 - Une meilleure efficacité et une meilleure circularité des matériaux – par exemple concevoir des bâtiments, des véhicules ou des emballages d'une manière qui réduise l'usage excessif des matériaux et qui facilite leur démantèlement, tri et recyclage en fin de vie ;
- **L'amélioration des systèmes de transformation des matériaux**, en particulier :
 - De nouvelles techniques de fabrication ou de construction, qui réduisent les rebuts de production ;
 - De nouveaux matériaux à haute résistance, qui réduisent le volume des intrants de matériaux nécessaires pour offrir le même service ;
 - Des systèmes de traçabilité des matériaux, facilités par les technologies numériques ;
 - Des systèmes de tri automatisés, qui facilitent une séparation poussée des matériaux ;
 - Des méthodes de séparation des constituants des matériaux composites (comme les textiles) ;
 - Des procédés métallurgiques améliorés, pour retirer les impuretés des déchets métalliques et pour produire des métaux de haute qualité à partir de la ferraille mélangée ;
- De **nouveaux modèles économiques**, basés sur des durées de vie des produits plus longues (grâce à la conception, à la maintenance, à des matériaux de meilleure

qualité, à la remise à neuf et à la réutilisation) et sur leur utilisation plus intensive (par le partage ou par le renforcement des taux d'occupation).

PERMETTRE L'ÉLECTRIFICATION DES TRANSPORTS ET DE L'INDUSTRIE

Dans le secteur des transports, l'enjeu crucial consiste à continuer de réduire le coût et d'améliorer la performance des batteries :

- Les investissements privés colossaux dont bénéficie actuellement la technologie dominante du lithium-ion rend très probable la perspective que **le prix des batteries baissera** à un rythme similaire à celui de la projection de BNEF de 88€/kWh (piles à combustible et pack) d'ici 2025 – et probablement auparavant.
- **Les améliorations de la densité énergétique, de la vitesse de chargement et de la durée de vie des batteries seront alors des facteurs plus déterminants que la poursuite de la réduction des coûts.** Des progrès de facteur 2 ou 3 dans la densité des batteries assureraient la domination des véhicules électriques à batteries pour le transport routier, même sur longues distances, et des progrès de facteur 5 à 10 seraient nécessaires pour rendre faisable l'électrification des trajets long courrier par bateau ou par avion. Ces progrès nécessiteraient des changements plus fondamentaux dans la chimie des batteries.

Dans les secteurs industriels, le principal enjeu est de développer des **fours électriques, en particulier pour le ciment**. De plus, la recherche fondamentale devra explorer le potentiel **d'innovations plus radicales en matière d'électrochimie**, à la fois pour la sidérurgie et pour l'industrie chimique.

FAIRE BAISSER LE COÛT DE LA PRODUCTION ET DE L'UTILISATION DE L'HYDROGÈNE

Vu le rôle majeur que l'hydrogène est certainement appelé à jouer, il est crucial de faire baisser le coût de sa production et de son utilisation, en visant en particulier à :

- **Faire radicalement baisser le coût de l'équipement d'électrolyse**, pour atteindre 220€ par kW d'ici le milieu des années 2020, contre 880€ par kW aujourd'hui ;
- **Réduire le coût de reformage du méthane à la vapeur associé à la capture du carbone** ;
- **Réduire le coût des piles à combustible** d'environ 88€ par kW aujourd'hui à moins de 70€ par kW d'ici 2025 pour les véhicules lourds moyens, et celui des réservoirs d'hydrogène de 13€ par kW aujourd'hui à 8€ par kW d'ici 2025.

RÉVOLUTIONNER L'INDUSTRIE CHIMIQUE PAR LA BIOCHIMIE ET PAR LA CHIMIE DE SYNTHÈSE

Si les émissions provenant des procédés industriels peuvent être éliminées par l'électrification, la combustion de biomasse ou la capture et le stockage du carbone, **le défi technique le plus complexe est l'élimination des émissions de fin de vie**, qui sont disséminées géographiquement, en particulier celles résultant de l'utilisation résiduelle des combustibles fossiles liquides (dans le transport aérien et maritime), des plastiques (lors de leur destruction) et des engrais (qui engendrent des émissions à la fois de CO₂ et de NO₂).

Quatre domaines d'innovation sont alors essentiels :

- La **biochimie**, où la principale difficulté consiste à permettre le développement de combustibles liquides ou de matières premières pour la production de matières

plastiques, tout en limitant l'utilisation des formes biomasse qui pourraient concurrencer la production alimentaire ou menacer la biodiversité, par :

- Le développement des **technologies biochimiques**, qui peuvent permettre l'exploitation des sources lignocellulosiques ;
- **L'ingénierie génétique des cultures** pouvant se développer sur des sols arides ou dans l'eau de mer, notamment les algues ;
- Une **plus grande efficacité des procédés de bioraffinerie** ;
- La **chimie de synthèse**, où les deux défis d'innovation essentiels sont :
 - La **réduction du coût de la capture directe du CO₂ dans l'air (DAC)** ;
 - La recherche de **procédés efficaces pour produire les composés aromatiques utilisés dans le plastique par électrochimie** ;
- Les **voies chimiques hybrides** – c'est-à-dire le fait de combiner les chimies biologiques et synthétiques ;
- Le **recyclage chimique des plastiques**, pour limiter la nécessité de disposer de nouvelles matières premières biologiques et synthétiques.

DÉVELOPPER DE NOUVEAUX MATÉRIAUX

Le potentiel de substitution des matériaux à forte intensité carbone par des matériaux moins émetteurs de carbone est important, par exemple :

- Dans le secteur de la construction, **l'utilisation du bois ou de nouvelles chimies de ciment, comme le ciment à base de pouzzolane, pour remplacer le ciment conventionnel (Portland)** ;
- Dans le secteur de l'emballage, des textiles et de l'industrie manufacturière, **l'utilisation de fibres à base de cellulose pour remplacer les matières plastiques** (et les bioplastiques, qui demande des intrants de biomasse plus importants que l'utilisation directe de fibres).

FAIRE BAISSER LE COÛT DES TECHNOLOGIES DE CAPTURE ET D'UTILISATION DU CARBONE

La principale difficulté liée à la capture et à l'utilisation du carbone n'est pas d'ordre technologique, mais plutôt la question de savoir comment parvenir à un déploiement suffisamment vaste pour entraîner des économies d'échelle et de courbes d'apprentissage.

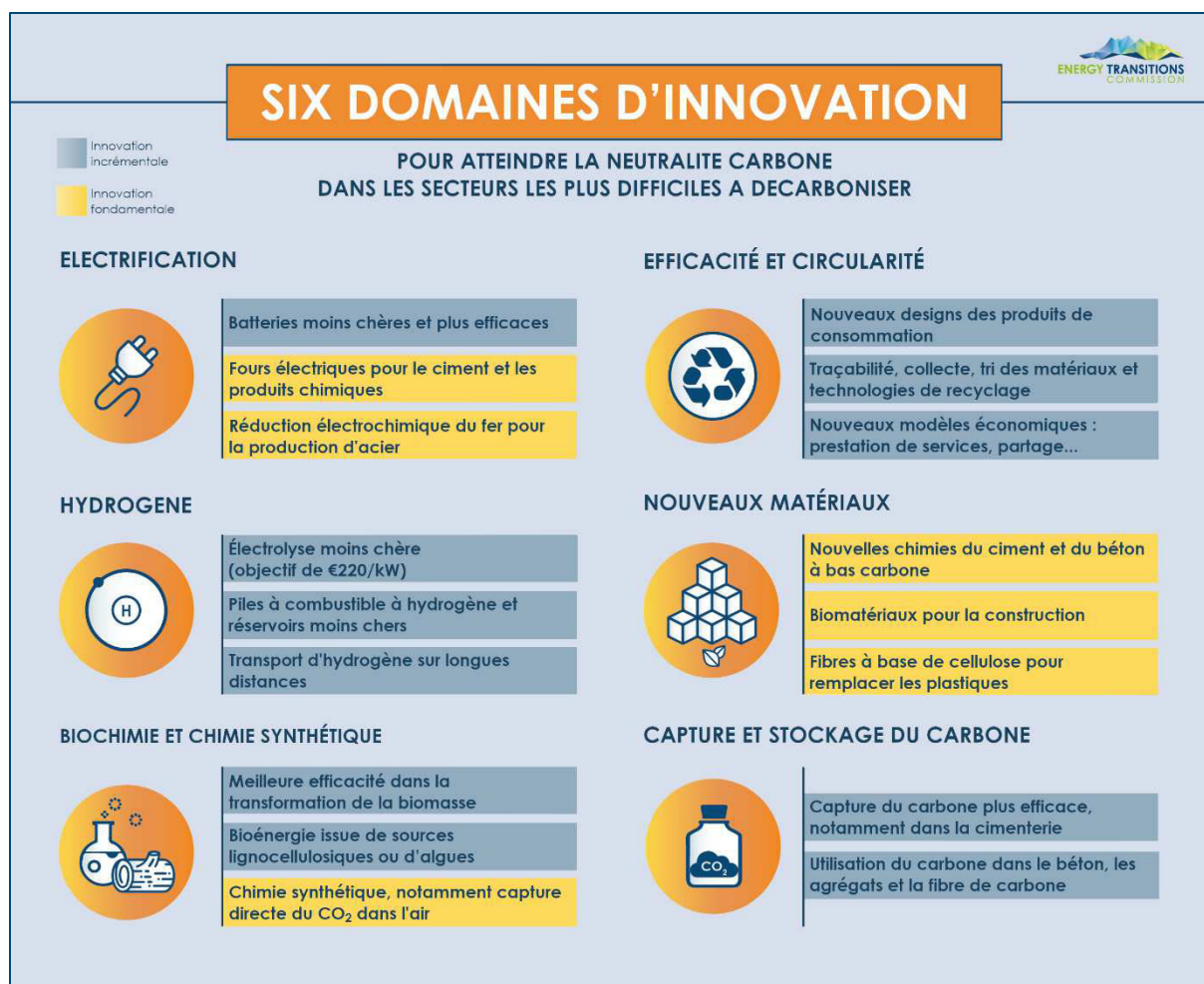


Figure 12

LE ROLE DES POLITIQUES PUBLIQUES

Étant donné qu'il existe des trajectoires multiples pour la décarbonisation de l'industrie lourde et des transports lourds, **l'action politique devrait avoir pour objectif d'inciter les acteurs privés à rechercher le mix de solutions optimal, tout en garantissant un soutien ciblé aux technologies qui seront nécessaires à la transition quelle que soit la trajectoire adoptée.** Quatre ensembles complémentaires de politiques publiques sont nécessaires pour accélérer le progrès.

UNE APPROCHE PRAGMATIQUE ET EFFICACE DE LA TARIFICATION DU CARBONE

Une tarification adéquate du carbone doit jouer un rôle central, en incitant à la fois à une meilleure efficacité énergétique, à la décarbonisation côté offre et à la réduction de la demande.

Les systèmes existants de tarification du carbone comme l'EU-ETS ont commencé à jouer un rôle dans la réduction des émissions de carbone, mais trois aspects ont toutefois limité leur efficacité :

- Le risque que si un accord international est impossible, l'imposition de taxes carbone dans un pays puisse entraîner des **délocalisations dans les secteurs exposés à la concurrence internationale** (par exemple l'acier). Ce risque a souvent débouché sur des exceptions sectorielles au sein des systèmes de tarification du carbone, y compris dans le cas de l'EU-ETS ;

- **Des coûts marginaux de décarbonisation très différents selon les secteurs**, qui, combinés à des plafonds d'émissions élevés, signifient que le prix du carbone effectif pour l'ensemble de l'économie pourrait être bien trop bas pour susciter un changement dans les secteurs aux coûts de décarbonisation les plus élevés (par exemple l'aviation) ;
- **L'incertitude liée aux prix à long terme dans les systèmes d'échange de quotas d'émissions**, qui ne fournissent pas de signaux de prix à long terme suffisamment forts et stables pour stimuler l'innovation technologique.

Il est essentiel de relever ces défis. **Des accords internationaux régissant tous les secteurs restent la solution idéale**, et il est essentiel de les promouvoir. Toutefois, les décideurs politiques devraient également reconnaître que, si la solution idéale n'est pas réalisable, il est cependant possible de réaliser de premiers pas en renforçant les systèmes existants d'échange de quotas d'émissions et en développant une approche complémentaire, certes imparfaite, mais néanmoins utile qui serait [Figure 13] :

- **Définie par avance**, reposant dans certains cas sur des taxes, qui apportent parfois un signal de long terme plus stable et donc des incitations plus puissantes que les prix fluctuants dans un système d'échange de quotas d'émissions ;
- **Différenciée par secteur**, afin de refléter les différences en termes de coûts marginaux de la décarbonisation et de maturité technologique, avec par exemple un prix du carbone bien plus élevé pour le transport maritime et aérien que pour les secteurs industriels de production de matériaux ;
- **Domestique/régionale**, avec par exemple un prix du carbone important appliqué au ciment (pour lequel la concurrence est essentiellement locale), même s'il n'est pas appliqué au même niveau à l'acier, qui pourrait continuer de bénéficier de la libre allocation au sein des systèmes d'échange de quotas d'émissions pour éviter les risques de fuite de carbone (combiné avec des normes technologiques de références de plus en plus ambitieuses afin de créer d'autres formes incitations à l'innovation et l'investissement) ;
- **Descendante (en aval)**, c'est-à-dire appliquée aux produits de consommation en fonction du niveau d'émissions tout au long de leur cycle de vie plutôt qu'aux processus de production, comme c'est déjà le cas des impôts indirects sur l'essence et le gazole, qui sont effectivement soumis à une taxe carbone quel que soit le site de production de pétrole brut et de raffinage.

Une telle approche de la tarification du carbone doit s'appliquer à limiter le risque de fuite de carbone entre secteurs et entre géographies, et peut nécessiter la mise en place de nouveaux systèmes afin de s'assurer de la traçabilité des émissions de carbone produites sur l'ensemble du cycle de vie des produits. Dans l'idéal, ces systèmes de prix du carbone seraient mis en place comme un premier pas vers l'obtention d'un cadre global cohérent de tarification du carbone.

PRIX DU CARBONE

LA TARIFICATION DU CARBONE DOIT JOUER UN RÔLE CENTRAL POUR ENCOURAGER LA DECARBONISATION DE L'INDUSTRIE LOURDE ET DES TRANSPORTS LOURDS

Des accords internationaux couvrant tous les secteurs sont idéaux et doivent être poursuivis.

Mais les gouvernements peuvent progresser sans attendre en adoptant une approche pragmatique.



UNE APPROCHE EFFICACE ET PRAGMATIQUE POUR LA TARIFICATION DU CARBONE

D éfinie à l'avance

Définir un signal à long terme qui motive les décisions d'investissement par le biais de taxes ou de prix planchers, plutôt que par un système de bourse impliquant la fluctuation des prix

D ifférenciée

Différente selon les secteurs – ex. un prix plus élevé est nécessaire dans le transport maritime que dans la sidérurgie pour réorienter les investissements

D omestique

Tarification au niveau domestique (national ou régional) pour des produits qui ne s'échangent pas au niveau international (ex. ciment), mais pas sur ceux soumis à la compétition internationale (ex. acier)

D ownstream (en aval)

Sur la teneur en carbone des produits de consommation (au cours de leur cycle de vie) plutôt que sur les processus de production (ex. taxer le contenu en carbone des emballages)

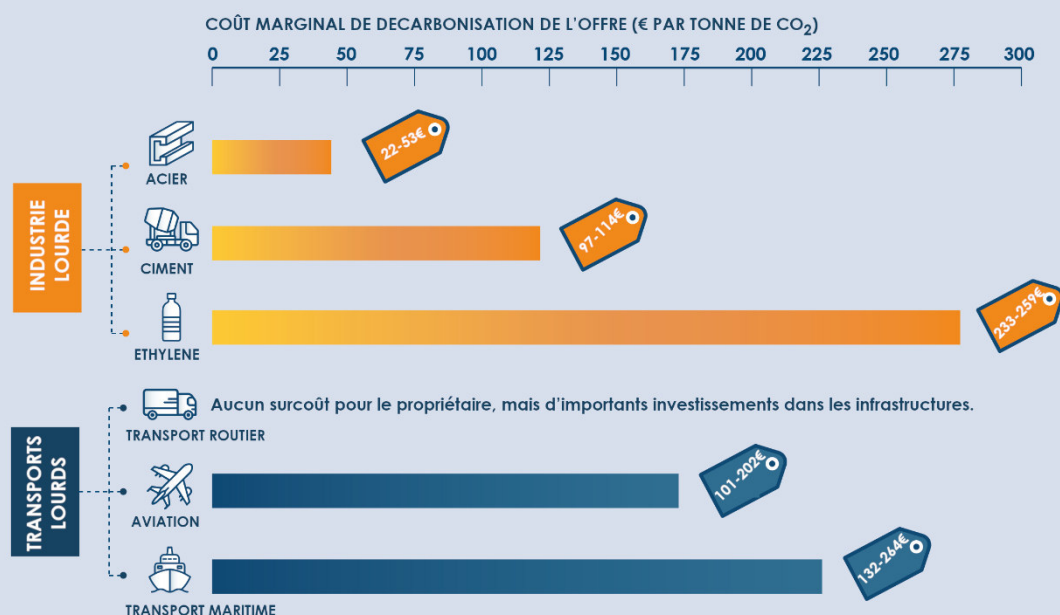


Figure 13

MANDATS ET RÉGLEMENTATIONS

Outre la tarification du carbone, des mandats réglementaires spécifiques pourraient et devraient inclure :

- La **réglementation de l'efficacité énergétique des équipements**, qui a été un moteur essentiel de l'amélioration de l'efficacité énergétique dans les secteurs de l'automobile et des appareils électroménagers, et qui est déjà appliquée par l'Organisation Maritime Internationale (OMI) pour les nouveaux bateaux ;

- Des **standards de durabilité strictement définis pour les carburants à faible intensité carbone** (y compris les bioénergies et l'hydrogène), sur la base d'une analyse solide du bilan carbone de différents carburants tout au long de leur cycle de vie et des autres types d'impact environnemental ;
- Des **obligations de carburant vert**, qui pourraient imposer aux compagnies aériennes et aux opérateurs maritimes d'utiliser un pourcentage toujours plus grand de combustibles zéro-carbone ;
- Des **réglementations qui interdisent la vente de camions à moteur diesel ou essence**, au-delà de dates spécifiées, et/ou qui interdisent leur utilisation dans les grandes villes ;
- **L'étiquetage et la réglementation de l'empreinte carbone des produits de consommation**, assurant la traçabilité des sources et du niveau d'émissions de carbone tout au long du cycle de vie du produit et de sa teneur en matériaux recyclés (par exemple pour les voitures ou les appareils électroménagers) ;
- Des **normes sur l'efficacité d'usage des matériaux**, en particulier dans les infrastructures, les bâtiments et les principaux biens de consommation ;
- Une **réglementation favorable à l'économie circulaire**, en particulier par l'extension de la responsabilité des producteurs en matière de recyclage des produits en fin de vie et par l'obligation de conception de produits pouvant être recyclés.

AIDE PUBLIQUE AU DEVELOPPEMENT DES INFRASTRUCTURES

La plupart des investissements nécessaires pour bâtir une économie zéro-carbone seront effectués par le secteur privé. Mais une coordination active ou un soutien direct à l'investissement de la part de la puissance publique pourraient s'avérer nécessaire pour les infrastructures clés, en particulier :

- Le **transport de l'électricité sur de longues distances et l'interconnexion des réseaux électriques**, pour faciliter une forte pénétration des énergies renouvelables intermittentes ;
 - Les **infrastructures de chargement et de ravitaillement en carburant des véhicules** le long des routes ainsi que dans les ports, et potentiellement dans les aéroports (si l'utilisation de l'hydrogène et de l'ammoniac se développe) ;
 - Les **infrastructures ferroviaires**, en particulier les connexions régionales à grande vitesse, pour faciliter un report modal plus important ;
- Les **infrastructures portuaires et les gazoducs**, pour favoriser le développement des échanges nationaux et internationaux de nouveaux combustibles, en particulier de l'hydrogène et de l'ammoniac ;
- Les **infrastructures de transport et de stockage du carbone**, pour lesquels les gouvernements ont un rôle essentiel à jouer en imposant des normes réglementaires strictes et en planifiant et approuvant le parcours des pipelines.

AIDE PUBLIQUE À LA RECHERCHE, AU DÉVELOPPEMENT ET AU DÉPLOIEMENT DE NOUVELLES TECHNOLOGIES

Le rôle optimal des politiques publiques pour accélérer le progrès technologique dépendra de la maturité de différentes technologies :

- **Déployer les technologies déjà avérées à l'échelle commerciale** : la plus grande partie de l'investissement doit alors provenir du secteur privé, mais les gouvernements pourraient accélérer le déploiement en facilitant le financement (par exemple par des garanties de prêt ou par des avances remboursables) et en utilisant les marchés

publics pour stimuler la demande pour les produits et pour les services de mobilité à faible impact carbone.

- **Commercialiser les technologies en cours de développement** : une combinaison de financement public et privé de l'innovation sera nécessaire pour accélérer la mise sur le marché de ces technologies, en particulier pour financer des projets pilotes.
- **Encourager les innovations radicales** : le financement public doit apporter un soutien direct à des domaines spécifiques de recherche, en particulier par l'intermédiaire de programmes qui définissent des objectifs quantitatifs spécifiques 10 à 15 ans à l'avance et qui sont prêts à soutenir plusieurs efforts de R&D simultanés en vue d'atteindre ces objectifs.

LE RÔLE DU SECTEUR PRIVÉ

L'action du secteur privé sera également indispensable pour parvenir à une décarbonisation totale de l'industrie lourde et des transports lourds.

SEKTOREN LES ORGANISATIONS INDUSTRIELLES DANS LES SECTEURS LES PLUS DIFFICILES A DECARBONISER

De nombreuses organisations industrielles dans des secteurs industriels clés et dans les transports lourds (notamment maritime et aérien) envisagent déjà de parvenir à des réductions de carbone significatives d'ici le milieu du siècle. Ces efforts pourraient être renforcés par :

- **Le développement de feuilles de route visant zéro émission carbone d'ici le milieu du siècle**, précisant comment les solutions transitoires telles que les compensations carbone ou l'utilisation du gaz seront supprimées à terme ;
- **Le développement d'initiatives trans-sectorielles pour développer la demande en produits à faible/zéro carbone** (par exemple un partenariat entre compagnies aériennes, aéroports et agences de voyage pour élaborer une offre de vols zéro-carbone) et pour soutenir la circularité des matériaux (par exemple un partenariat entre producteurs d'acier et constructeurs automobiles pour améliorer les taux de collecte et la qualité des ferrailles d'acier) ;
- **Le recours à leur capacité de lobbying pour militer en faveur d'accords internationaux ambitieux sur la tarification du carbone.**

ENTREPRISES DANS LES SECTEURS LES PLUS DIFFICILES À DECARBONISER

En parallèle, **les grandes entreprises industrielles ont déjà commencé à se préparer à réduire leurs émissions en carbone**, certaines s'engageant en faveur d'objectifs fondés sur des scénarios scientifiques (science-based targets), quelques autres prenant des engagements plus audacieux visant à atteindre zéro-carbone en 2040 ou 2050. Nous espérons qu'un nombre toujours plus grand d'entreprises continueront à :

- **Investir dans des projets de R&D**, en particulier des usines pilotes, centrées sur les grandes priorités d'innovation soulignées plus haut ;
- **Développer des partenariats afin d'assurer une plus grande efficacité d'usage et un meilleur recyclage des matériaux ;**
- **Développer des partenariats régionaux dans les zones industrielles** afin de soutenir le développement des infrastructures et les synergies industrielles ;

- **Baser leur stratégie commerciale à long terme et leurs rapports annuels à leurs actionnaires sur des objectifs de réduction de carbone fondés sur des scénarios scientifiques ambitieux**, qui visent la neutralité carbone d'ici le milieu du siècle.

PRINCIPAUX ACHETEURS DE MATÉRIAUX ET DE SERVICES DE MOBILITÉ

Les gros acheteurs de matériaux et de services de mobilité, en particulier les grosses entreprises multinationales et les services de passations des marchés publics, peuvent accélérer les changements dans les secteurs les plus difficiles à décarboniser, en créant une demande de matériaux et de services de mobilité « verts », initialement à un prix avantageux. Ces initiatives pourraient inclure :

- **L'expansion de l'engagement EV100** (engagement en faveur de véhicules 100% électriques) pris par les entreprises et par les villes aux camions et aux bus électriques (BEV ou FCEV) ;
- **Un engagement en faveur de matériaux à faibles émissions de carbone sur le cycle de vie dans les bâtiments commerciaux et industriels**, venant compléter les objectifs existants déjà en matière d'efficacité énergétique du bâti ;
- **Un engagement en faveur de l'achat de vols zéro-carbone**, qui pourrait être une alternative à l'achat de compensations carbone visant à compenser les déplacements professionnels par avion.

CONSOMMATEURS

À l'exception du transport aérien et de certains sous-secteurs des transports maritimes et du transport routier lourd (par exemple les bus), **les secteurs les plus difficiles à décarboniser ne sont pas directement exposés à la pression des consommateurs**. Cependant, matériaux et transport de marchandises sont essentiels à la fourniture de la majeure partie des produits de consommation finaux. Un étiquetage adéquat du niveau d'émissions de carbone tout au long du cycle de vie des produits (par exemple pour les voitures, les appareils électroménagers) et des services (par exemple pour les vols en avion) permettrait d'établir une traçabilité et serait un puissant outil de sensibilisation des consommateurs. Il permettrait également de faciliter la création d'une « offre verte » à un prix avantageux, dans la mesure où l'impact de la décarbonisation sur les coûts à la consommation est relativement faible.

INVESTISSEURS PUBLICS ET PRIVÉS

De nouvelles opportunités d'investissement verront le jour à la fois dans des infrastructures à faible carbone et dans des entreprises qui sauront tirer profit des innovations à faible carbone que ce soit dans les matériaux, les produits et les modèles économiques. Les investisseurs pourraient contribuer à l'accélération de la décarbonisation en :

- **Évaluant mieux les risques et les opportunités financières liés au climat**, en s'attachant non pas seulement au secteur de l'énergie, mais aussi aux secteurs de l'industrie et des transports ;
- **Développant des plans clairs de transition de leurs portefeuilles d'investissement sur la durée**, en augmentant les investissements dans les infrastructures à faible carbone et en réduisant les investissements dans des actifs potentiellement obsolètes ;
- **Développant une gamme de produits d'« investissement vert »** présentant des profils de risque-amortissement différents, avec le soutien des banques de développement pour faciliter les investissements dans les infrastructures dans les pays en développement.



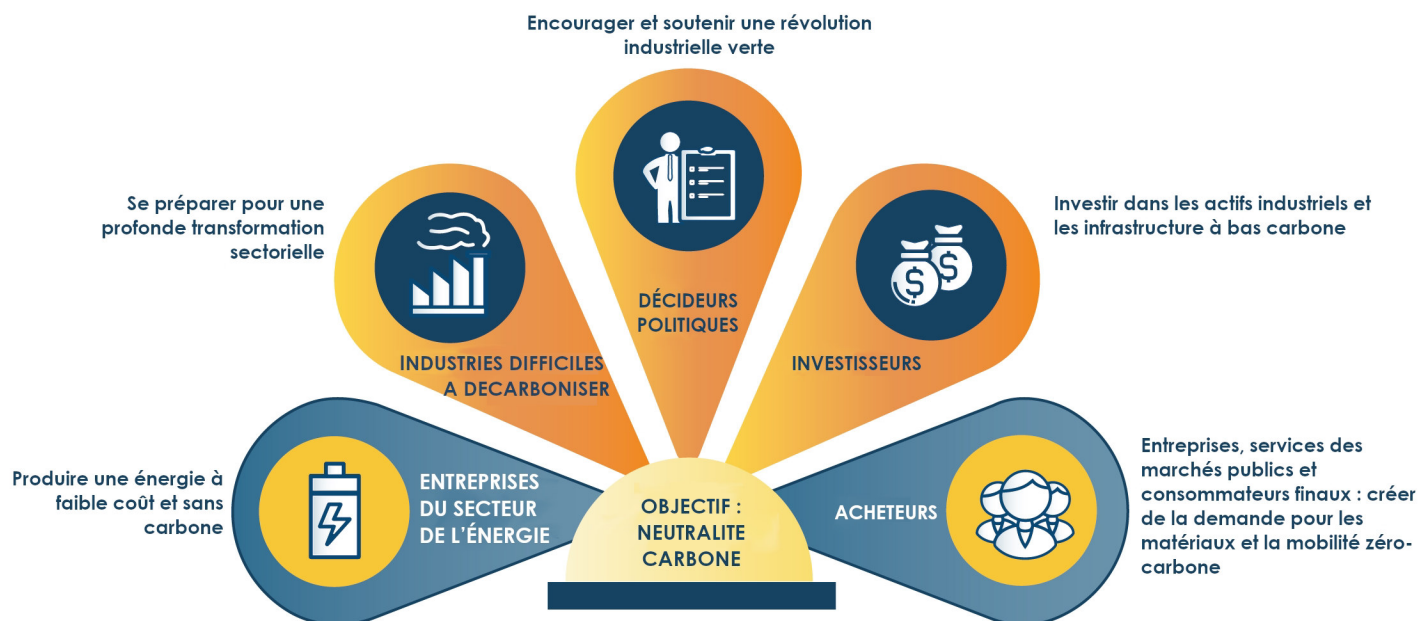
GAGNER LA BATAILLE DU CLIMAT

L'Energy Transitions Commission est convaincue qu'il est possible de parvenir à la neutralité carbone nette des secteurs économiques réputés les plus difficiles à décarboniser d'ici le milieu du siècle, augmentant de façon significative les chances de limiter le réchauffement global à 1,5°C. Le succès de cette entreprise historique limiterait non seulement l'impact négatif du changement climatique, mais stimulerait aussi la croissance, par le biais d'innovations technologiques rapides, de créations d'emplois dans de nouvelles industries, et d'externalités positives environnementales locales considérables. Les autorités nationales et locales, les entreprises, les investisseurs et les consommateurs ont donc la responsabilité de prendre les mesures nécessaires pour atteindre cet objectif.

GAGNER LA BATAILLE DU CLIMAT

Si tous les acteurs concernés agissent collectivement et immédiatement, il est techniquement et économiquement possible de parvenir à la neutralité carbone dans les secteurs difficiles à décarboniser.

NOS RESPONSABILITÉS RESPECTIVES



LEVIERS DE CHANGEMENT

QUI

QUOI

1

FIXER DES OBJECTIFS AMBITIEUX DE RÉDUCTION DE CARBONE



Renforcer les réglementations sur les émissions carbone des procédés industriels et des transports lourds, et sur la teneur en carbone des produits de consommation.

2

METTRE UN PRIX SUR LE CARBONE



Poursuivre des accords internationaux, mais fixer sans attendre des prix du carbone à l'échelle nationale, définis par avance, différenciés par secteur ou sur les produits finis.

3

PASSER D'UNE ÉCONOMIE LINÉAIRE À UNE ÉCONOMIE CIRCULAIRE



Renforcer les collaborations au sein des chaînes de valeur pour améliorer l'usage et le recyclage des matériaux, au moyen d'une stricte réglementation.

4

INVESTIR DANS L'INDUSTRIE VERTE



Investir dans les projets de R&D et le déploiement commercial des technologies de décarbonisation pour les secteurs les plus difficiles à décarboniser.

5

CRÉER DE LA DEMANDE POUR LES PRODUITS ET SERVICES VERTS



Prendre des engagements en matière d'« achat écologique », par exemple de camions, de composants industriels ou de matériaux de construction.

6

FAIRE BAISSER LE COÛT DES ÉNERGIES RENOUVELABLES



Faire baisser le coût et accélérer la croissance de la production d'électricité et d'hydrogène zéro-carbone, et de bioénergie réellement durable.



