

Game changers pour la transition énergétique

Olivier Appert, Félix Elefant,
Richard Lavergne*, Denis Randet

@ 14883

Mots-clés : technologies, transition énergétique, climat, compétitivité, neutralité carbone

L'Association nationale recherche technologie (ANRT) dispose d'un groupe de travail permanent dont la mission est de soutenir les pouvoirs publics dans l'élaboration de la stratégie nationale de la recherche énergétique (SNRE) prévue par l'article L. 144-1 du code de l'énergie et qui constitue le volet énergie de la stratégie nationale de recherche prévue à l'article L. 111-6 du code de la recherche. L'article L. 144-1 précité confie aux ministres chargés de l'énergie et de la recherche la tâche d'élaborer la SNRE en prenant en compte les orientations de la politique énergétique et climatique définies par la stratégie nationale bas carbone (SNBC) et la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) qui sont toutes deux révisées au moins tous les 5 ans, soit au plus tard d'ici 2024 pour les nouvelles éditions. C'est dans ce contexte que le groupe de travail «SNRE» a examiné les ruptures — ou game changers — en matière de technologie pour la transition énergétique.

La stratégie française pour l'énergie et le climat (SFEC) publiée le 23 avril 2020 par les ministères chargés de l'énergie et de l'environnement a deux composantes : la SNBC, qui est la feuille de route de la France pour atteindre l'objectif de «neutralité carbone» à 2050, et la PPE qui est la trajectoire énergétique de la France pour les 10 prochaines années.

Cette neutralité carbone suppose des efforts importants et elle ne sera pas atteinte sans des ruptures dans les comportements et les technologies. Le groupe de travail a choisi de reprendre le concept de «*game changers*» utilisé initialement par l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE), en lien avec ses scénarios décrits dans les rapports *World Energy Outlook* et sur la base des technologies identifiées dans la base de données

des rapports *Energy Technology Perspectives*. Il est nécessaire de les identifier et d'envisager des mesures à prendre pour les exploiter ou y faire face.

Depuis plusieurs années, un des groupes de travail de l'ANRT se consacre à la transition énergétique, en appui à la SNRE. Sur la base d'auditions de porteurs de projets et d'experts des différents secteurs, ce groupe a engagé une démarche de type SWOT (*Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats*, soit forces, faiblesses, opportunités et menaces) qui s'est déroulée de mi-2022 à mi-2023 pour qualifier diverses ruptures potentielles à l'horizon 2030-2040.

La technologie n'est pas seule en cause mais, selon le mandat de l'ANRT, le groupe s'est surtout attaché aux conditions et aux effets potentiels

* Conseil général de l'économie.

Game changers pour la transition énergétique

du progrès technologique, avec l'objectif d'aider à définir les priorités françaises en matière de recherche, de développement, d'industrie et de services. Les membres du groupe sont bien entendu conscients que les comportements des citoyens et des entreprises constituent des facteurs

cruciaux. Les actions des pouvoirs publics et les signaux économiques permettant de les orienter, ainsi que les investissements correspondants, sont à considérer avec soin, en tenant compte de l'évolution des marchés, de la concurrence internationale, de nos capacités scientifiques, techniques et

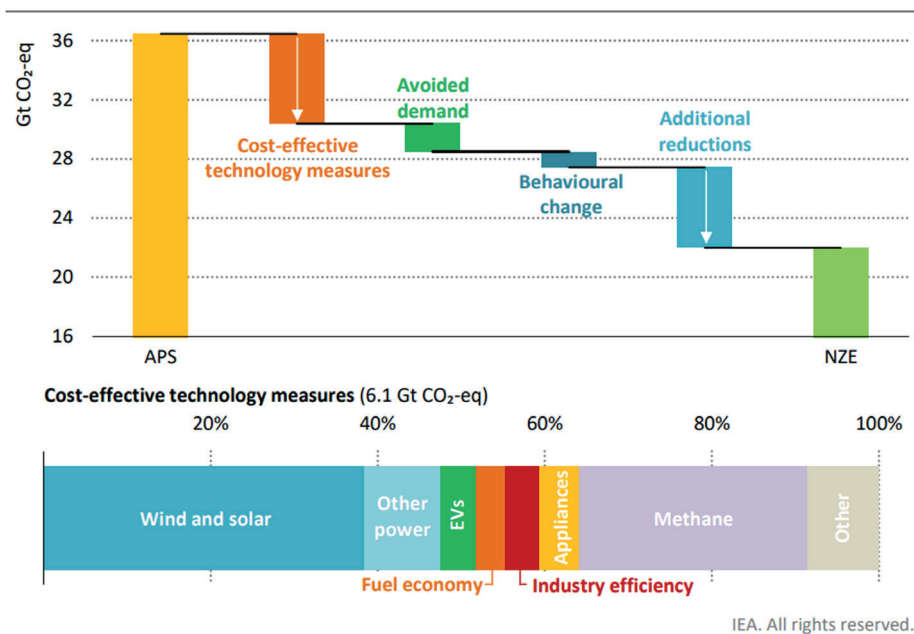


Figure 1. Répartition des mesures permettant de combler l'écart d'ici 2030 entre les scénarios NZE¹ et APS² de l'AIE

Source : *World Energy Outlook*, AIE, octobre 2021, page 107

1. Le scénario Net Zero Emissions by 2050 (NZE). Il s'agit d'un scénario normatif de l'AIE qui montre une voie étroite mais réalisable pour que le secteur mondial de l'énergie parvienne à des émissions nettes de CO₂ nulles d'ici à 2050, les économies avancées parvenant à des émissions nettes nulles avant les autres. Ce scénario permet également d'atteindre les principaux objectifs de développement durable (ODD) des Nations unies liés à l'énergie, notamment en assurant un accès universel à l'énergie d'ici à 2030 et en améliorant considérablement la qualité de l'air. Le scénario NZE ne s'appuie pas sur des réductions d'émissions en dehors du secteur de l'énergie pour atteindre ses objectifs, mais part du principe que les émissions non énergétiques seront réduites dans la même proportion que les émissions énergétiques. Il est compatible avec la limitation de l'augmentation de la température mondiale à 1,5 °C sans dépassement de température (avec une probabilité de 50 %).

2. Le scénario Announced Pledges Scenario (APS) apparaît pour la première fois dans ce *World Energy Outlook*. Il tient compte de tous les engagements pris par les gouvernements du monde entier en matière de climat, y compris les CDN et les objectifs net zéro à plus long terme, et suppose qu'ils seront respectés dans leur intégralité et dans les délais impartis. Les tendances mondiales de ce scénario représentent l'ampleur cumulée de l'ambition mondiale en matière de lutte contre le changement climatique à la mi-2021. La différence qui subsiste dans les émissions mondiales entre les résultats de l'APS et les objectifs normatifs de la NZE ou du scénario Sustainable Development montre le «déficit d'ambition» qui doit être comblé pour atteindre les objectifs convenus à Paris en 2015.

(Traduction libre d'après le *World Energy Outlook* 2021.)

financières, ainsi que des conséquences de nos investissements futurs sur la balance des paiements et l'emploi.

Le rapport rendant compte de ces travaux a été publié durant l'été 2023 afin qu'il puisse contribuer à la SFEC 2024 et à la SNRE qui s'ensuivra. Le lecteur pourra se reporter à ce rapport pour avoir des compléments sur la démarche retenue par le groupe de travail [ANRT, 2023].

1. Contexte international

La Figure 1 de l'AIE indique qu'au niveau mondial il existe un déficit d'ambition d'environ 14 Gt CO₂ d'émissions à l'horizon 2030 entre les promesses annoncées par les pays qui ont ratifié l'Accord de Paris et les émissions compatibles avec un scénario de type «neutralité carbone».

Il apparaît que 40 % de ce déficit peut être comblé par des mesures favorisant le déploiement de technologies «coût-efficaces» et 25 % par des mesures d'efficacité et sobriété énergétique, y compris en efficacité d'usage des matériaux et en numérique. L'AIE estime que l'écart résiduel pourrait être comblé par des progrès relevant des domaines tels que l'électrification, les combustibles à base d'hydrogène, le CCS (captage, stockage et utilisation du carbone) et les émissions négatives.

2. Les «game changers» dépendent des «circonstances nationales»

La disponibilité de ressources naturelles, la disponibilité d'infrastructures, les modes de vie, la démographie, la géographie (dont la possibilité de bénéficier d'interconnexions), etc., impactent fortement la consommation d'énergie et la sécurité énergétique d'un pays (on parle aussi d'autonomie stratégique). Par exemple, la forte proportion d'électricité bas carbone (surtout nucléaire et hydraulique) est une singularité et un atout potentiel de la France depuis quelques décennies. Il revient à chaque pays de trouver son chemin, même si le voisinage et les interconnexions plaident pour des concertations et des solidarités européennes.

Pour la France, une étude sur les *game changers* se justifie d'autant plus que, depuis plusieurs années, aucun exercice de ce type n'a été engagé comportant un volet lié à la transition énergétique, comme pouvaient l'être les rapports «Technologies clés» de la DGE (Direction générale des entreprises, ministère de l'Économie, des Finances et de la Souveraineté industrielle et numérique). Fort heureusement, l'AIE a continué de publier périodiquement ses rapports «*Energy Technology Perspectives*¹», mais ils sont de portée mondiale et ils décrivent trop de technologies pour apporter une aide directe aux pouvoirs publics français.

3. Nature des game changers

Les ruptures à considérer peuvent être regardées de deux façons :

1. Les ruptures qui peuvent changer le paysage mondial :

- celles qui atteignent le stade industriel,
- celles qui ne sont pas mûres, mais qui résoudraient un problème majeur aujourd'hui sans solution.

2. Les ruptures qui pourraient modifier la position française ou européenne, positivement ou négativement :

- en positif, grâce au développement de nos atouts,
- en négatif, si d'autres pays exploitent ces ruptures au détriment de nos approvisionnements ou de notre production.

Le groupe s'est appuyé sur les considérations de base suivantes :

- L'intermittence et la dissémination de la production d'électricité d'origine renouvelable (photovoltaïque et éolien) posent des problèmes que peuvent réduire la flexibilité, l'interconnexion, le pilotage, le stockage. Le stockage intersaisonnier reste cependant

Game changers pour la transition énergétique

sans solution économiquement acceptable à ce jour.

- Dans des secteurs à forte inertie, tels que l'agriculture et le bâtiment, des progrès diffus, fondés sur des solutions éprouvées, peuvent conduire à faire évoluer les usages, les procédés et les infrastructures.
- Les investissements mondiaux considérables faits depuis quinze ans au titre des énergies renouvelables (production, distribution, usages) ont abouti à l'industrialisation massive de trois technologies nouvelles : les panneaux photovoltaïques, les éoliennes, les batteries lithium-ion. À cet égard, la Chine a su établir des positions monopolistiques, y compris dans l'approvisionnement en certains matériaux critiques.
- L'essor de la voiture électrique va bouleverser la filière automobile et présente un risque de perte de valeur pour les constructeurs européens de voitures thermiques.
- Le numérique connaît de multiples mutations : co-conception des processeurs, intelligence artificielle (IA), internet des objets (IoT), calcul rapproché (*edge computing*). Dans ce secteur également, il existe un risque de captation des chaînes de valeur.
- Comme de nombreux économistes l'ont souligné, la transition énergétique a coûté et va coûter très cher. Les progrès techniques seront difficiles, faute d'argent et de compétences. C'est une raison supplémentaire pour identifier les *game changers* et définir les priorités de la France.

4. Les 14 filières identifiées comme étant les principales concernées

Le groupe de travail s'est attaché à identifier des *game changers* parmi les technologies présentes au sein de 14 filières industrielles. Ces filières peuvent être regroupées en 4 catégories :

A. Technologies de l'offre en énergie

- A1. Énergie solaire
- A2. Énergie éolienne
- A3. Énergie nucléaire
- A4. Biomasse et déchets pour l'énergie

B. Technologies d'interface offre-demande

- B1. Réseaux (électricité, gaz, chaleur)
- B2. Technologies numériques
- B3. Hydrogène bas carbone
- B4. Gaz et carburants bas carbone (hors hydrogène)

C. Technologies de la demande en énergie

- C1. Véhicules légers
- C2. Véhicules lourds et aviation
- C3. Industrie
- C4. Bâtiment

D. Captage, stockage et utilisation du carbone

- D1. Bois et forêts
- D2. Captage artificiel, stockage et valorisation du CO₂

Pour chaque technologie, le groupe de travail s'est intéressé à l'impact, la progression ainsi

que le positionnement français et européen, afin d'indiquer les défis et facteurs clés de succès et de faire des recommandations. Ces indications sont davantage une base pour des analyses ultérieures que des feuilles de route. Le groupe de travail s'est cependant efforcé de donner une idée du positionnement des principales entreprises concernées et de la R&D publique.

5. Technologies de l'offre en énergie

Le groupe de travail a identifié 4 domaines de rupture : l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie nucléaire, la biomasse et les déchets valorisables en énergie.

5.1. Énergie solaire

Les principaux enjeux résident dans le photovoltaïque qui n'est actuellement à l'origine que de 5 % de la production totale d'électricité française mais qui présente de fortes opportunités dans de nombreux autres pays disposant de moins d'électricité décarbonée ou plus ensoleillés.

L'Asie du Sud-Est produit 98 % des plaquettes de silicium photovoltaïque utilisées dans le monde, avec de bons rendements de conversion. La concurrencer sur ce terrain demanderait d'énormes investissements. Il reste cependant beaucoup de valeur ajoutée dans la configuration, l'installation et le raccordement des panneaux incorporant les plaquettes.

La R&D sur les cellules photovoltaïques en couches minces garde un sens, compte tenu de leur supériorité potentielle, mais, sans base industrielle, la suite sera difficile.

Le groupe recommande d'anticiper la croissance de la part d'électricité intermittente et de développer l'électronique de puissance pour assurer les interfaces (voir ci-après les réseaux).

5.2. Énergie éolienne

Les éoliennes flottantes constituent un *game changer* : elles bénéficient de vents puissants et réguliers et soulèvent moins de difficultés

d'acceptation. La France dispose d'une façade maritime importante. Les entreprises françaises de l'*offshore* ont des atouts sur le marché des flotteurs et des ancrages. Cependant, les aimants des générateurs électriques proviennent essentiellement de Chine.

Le groupe de travail recommande de poursuivre la R&D sur les flotteurs, ainsi que sur les matériaux et la conception des éoliennes.

Il faudrait réduire les contraintes réglementaires pesant sur les expérimentations en mer.

5.3. Énergie nucléaire

Les énergies nucléaire et hydraulique sont les principales sources bas carbone et pilotables de production d'électricité. Leur développement constitue un enjeu mondial, même si peu de pays maîtrisent industriellement la filière nucléaire. La France a construit dans les années 1970-1980 une position exceptionnelle couvrant l'ensemble du cycle enrichissement-exploitation-retraitement-stockage. Aujourd'hui, pour la France, l'enjeu est de maintenir cette position ou de la restaurer, en particulier de reconstituer la production industrielle de grands réacteurs électrogènes et de tenir les coûts et les délais des réacteurs EPR2 programmés pour 2035. C'est le *game changer* essentiel, qui permettra à la France de continuer à faire partie des leaders mondiaux. Même si le défi est industriel, la R&D doit y contribuer, car on attend de ces nouveaux réacteurs des performances améliorées en sûreté et flexibilité. La R&D a aussi un rôle important à jouer sur les autres éléments du cycle, les futurs réacteurs à neutrons rapides et la prolongation de la durée d'exploitation des réacteurs actuels.

Si les SMR (*Small Modular Reactors*) sont cités comme des *game changers*, c'est parce qu'ils sont potentiellement plus sûrs, plus acceptables et moins chers si on arrive à les produire en série. Le projet Nuward d'EDF, utilisant l'expérience de TechnicAtome sur les réacteurs de sous-marins, vise à produire de l'électricité et de la chaleur. Pour la France, cette technologie est à considérer comme une extension d'offre, destinée

principalement à l'exportation, ce qui suppose tout un réseau de coopérations internationales et une harmonisation des référentiels de sûreté.

5.4. Biomasse et déchets valorisés pour l'énergie

En 2021, 14 % de la consommation d'énergie primaire française provenait des énergies renouvelables (EnR), dont 53 % issus de la biomasse. Le Secrétariat général à la planification écologique (SGPE) prévoit d'ici 2030 un recours croissant à la bioénergie et autres chaleurs renouvelables. En France, la méthanisation (production de biogaz à partir de biomasse) est passée de 1,2 TWh en 2019 injecté dans le réseau gazier à environ 10 TWh aujourd'hui. Un point de vigilance est que l'exploitation de la biomasse pour l'énergie ne menace pas la souveraineté alimentaire.

Le groupe recommande de veiller à développer le potentiel de ressources en biomasse et déchets valorisables en respectant les contraintes locales d'adaptation au changement climatique. Il recommande également de poursuivre la R&D pour garantir la cohérence du cycle du carbone, préserver les écosystèmes, utiliser les déchets solides et la biomasse non alimentaire.

6. Technologies d'interface offre-demande

Le groupe de travail a identifié 4 filières d'intérêt : les réseaux (électricité, gaz, chaleur), le numérique, l'hydrogène bas carbone et les gaz et carburants bas carbone (hors hydrogène).

6.1. Réseaux

L'extension des usages de l'électricité et la part croissante de la production intermittente vont nécessiter un pilotage plus intelligent et décentralisé du réseau électrique.

Il faudra développer sa flexibilité, des moyens de stockage multiservices, et des mécanismes de prix permettant de les rémunérer.

Il serait bon de développer un programme national d'électronique de puissance pour être capables de produire les moyens de raccordement des énergies renouvelables intermittentes au réseau.

6.2. Technologies numériques (5G, cloud & edge computing, IoT, IA...)

La transition énergétique ne peut pas réussir sans les technologies numériques, même s'il faut veiller à leur consommation d'énergie. Elles sont en pleine évolution : accroissement des débits (5G, 6G...), internet des objets (IoT), intelligence artificielle (IA), exploitation des données satellitaires... Le parallélisme, le calcul au plus près (*edge computing*), le remplacement des processeurs universels par des processeurs spécialisés conçus avec les clients changent la donne et ouvrent des possibilités nouvelles. Américains et Européens investissent pour échapper à la domination asiatique mais l'Europe ne représente actuellement que 8 % de la production mondiale.

L'UE et les pays européens les plus impliqués ont pris des initiatives d'envergure : un Projet important d'intérêt européen commun (PIIEC) est axé sur la microélectronique et la connectivité ; douze projets français ont été approuvés, pour 7 G€. La microélectronique est un axe du plan d'investissement «France 2030». Dans le cadre de la stratégie pour l'électronique, il est prévu de doubler en cinq ans une production française déjà significative avec ST Microelectronics, Soitec, Kalray. D'autre part, la position d'OVHcloud dans les serveurs est un atout.

Il faut aussi intensifier la R&D dans le domaine de la cybersécurité.

6.3. Hydrogène bas carbone

L'hydrogène est nécessaire en chimie. Il pourrait être un carburant pour les transports et un moyen indirect de stocker l'électricité. L'Europe est plutôt bien placée dans la course technologique. L'industrie et la recherche en France sont en pointe pour la cryogénie, le transport liquide,

le stockage. Cependant, fabriquer de l'hydrogène sans émettre de CO₂ est encore très coûteux. L'alternative est d'importer de l'hydrogène vert, produit par électrolyse dans des pays où les énergies renouvelables sont abondantes, au risque de remplacer une dépendance énergétique par une autre, ou d'utiliser de l'électricité d'origine nucléaire. On commence, heureusement, à s'intéresser au potentiel de l'hydrogène naturel.

La R&D vise à accroître le rendement des électrolyseurs et à réduire leur teneur en matériaux importés.

Le rendement des piles à combustible est aussi un sujet de R&D.

La combinaison des deux rendements, pour l'électrolyse et pour la pile à combustible, est un handicap pour les transports courants, et pour le stockage intersaisonnier.

Le stockage et le transport de l'hydrogène posent des problèmes de coût et de sécurité. Une alternative est son incorporation dans du méthanol ou de l'ammoniac.

La production d'hydrogène naturel doit faire l'objet d'études approfondies.

6.4. Gaz et carburants bas carbone (hors hydrogène)

Les transports lourds ou à longue distance ont besoin de carburants à base de gaz ou de liquides qui soient à la fois à haute densité énergétique et bas carbone. Les biocarburants ne représentaient que 1,3 % de l'énergie primaire consommée en France en 2021 mais notre pays dispose de grandes entreprises qui sont impliquées dans le développement des biocarburants et des e-fuels de 2^e et 3^e générations.

Il faut analyser les cycles complets de production et intégrer les enjeux liés aux ressources (biomasse, eau, énergie décarbonée, CO₂...). En effet, les carburants bas carbone peuvent avoir un faible rendement énergétique et leur production peut dégrader l'environnement.

Il faut favoriser l'harmonisation des normes internationales de façon à assurer la compatibilité des réseaux et des approvisionnements.

7. Technologies de la demande en énergie

Le groupe de travail a identifié 4 filières d'intérêt : les véhicules légers, les véhicules lourds et l'aviation, l'industrie, le bâtiment.

7.1. Véhicules légers

La batterie électrique est le principal *game changer*. Elle va devenir le réservoir d'électricité des automobiles et des VUL (véhicules utilitaires légers). Actuellement l'Asie domine le marché, avec la production de masse de batteries lithium-ion, mais l'Amérique et l'Europe, dont l'industrie automobile est menacée, commencent à réagir et peuvent espérer s'imposer comme des constructeurs majeurs, à l'inverse des panneaux photovoltaïques.

Les batteries actuelles sont lourdes et avantage les constructeurs automobiles disposant de *gigafactories* à proximité. La R&D peut encore apporter des progrès significatifs en termes de capacité, sécurité, vitesse de charge et coût, mais cela résultera davantage du perfectionnement de la filière lithium-ion que du développement d'autres formes de batteries basées sur des concepts innovants, y compris les batteries de type «tout solide» dont la mise au point paraît encore lointaine. Le premier enjeu est donc de consacrer des moyens suffisants — dont de la R&D — à la mise en service de *gigafactories* de batteries lithium-ion afin de réduire les coûts. Il faut aussi sécuriser l'approvisionnement en matériaux critiques et essayer de s'en passer grâce au recyclage des batteries et à de nouvelles combinaisons chimiques.

Le réseau des bornes de recharge le long des routes et la communication électrique bidirectionnelle entre batteries de voitures et réseau domestique vont aussi demander de la R&D et des investissements importants.

7.2. Véhicules lourds et aviation

Les batteries ne sont pas la solution qui s'imposera pour les avions, ni pour des transports lourds à longue distance. Il faudra principalement recourir à des carburants alternatifs (SAF – *Sustainable Aviation Fuels*, e-fuels, biocarburants...). L'hydrogène est envisageable, avec les contraintes déjà citées. Il n'apparaît pas de solution unique et des analyses en cycle de vie (ACV) sont nécessaires, en tenant compte de la construction des véhicules, de leur usage, des matériaux utilisés et du recyclage.

7.3. Industrie

La réduction de 85 % des GES de l'industrie française envisagée à l'horizon 2050 est un objectif très ambitieux, d'autant que s'ajoutent de nouvelles contraintes, comme le recyclage. Outre l'électrification des procédés et les modifications que cela implique, il faudra exploiter la chaleur fatale, privilégier les coproductions dans des parcs permettant de mutualiser les énergies et les infrastructures. Le CCS, qui sera évoqué ci-après, peut jouer un rôle important.

De la R&D et de gros investissements sont incontournables. Il paraît nécessaire que les pouvoirs publics accompagnent financièrement ces transformations, en particulier pour la décarbonation des industries fortement émettrices.

7.4. Bâtiment

Outre la structuration de l'offre industrielle, tant pour l'existant que pour le neuf, où la France a beaucoup de progrès à faire mais qui ne relève pas des compétences du groupe de travail de l'ANRT, l'enjeu principal est d'améliorer les procédés pour la rénovation du bâtiment existant : isolation des bâtiments, décarbonation du chauffage et de la climatisation. Un *game changer* est le BIM (*Building Information Modeling*, soit modélisation des données du bâtiment). Complété par des réseaux de capteurs, il permet de mieux gérer les installations, de constituer des réseaux multi-énergies, de concevoir les installations nouvelles,

tout cela en tenant compte des hypothèses de changement climatique.

8. Captage, stockage et utilisation du carbone (CCS)

Sous cette rubrique, ont été regroupés à la fois l'usage du bois et des forêts ainsi que les techniques de captage artificiel, de stockage et de valorisation du CO₂. Au niveau mondial, le CCS est considéré par le GIEC comme incontournable pour respecter l'Accord de Paris de 2015 sur le climat. Il permet² à la fois de réduire les émissions de CO₂ — selon l'AIE, le CCS pourrait contribuer à presque 15 % des réductions cumulées par rapport à son scénario tendanciel — et de générer des émissions négatives (bioénergie avec captage et stockage du CO₂, captage direct dans l'air du CO₂ suivi de son stockage).

8.1. Bois et forêts

La forêt (avec les prairies et les marécages) est l'un des milieux terrestres qui stocke le plus de carbone et son usage approprié constitue un *game changer* pour la décarbonation de l'économie mondiale et française en particulier. En France, 40 millions de mètres cubes sont récoltés chaque année en bois d'œuvre (50 %), pour l'industrie (27 %) et pour l'énergie (23 %). La France fait beaucoup de R&D sur les capacités d'absorption de CO₂, la résistance aux épidémies et aux variations du climat, la contribution des arbres à la qualité des sols. Cependant, la forêt française vieillit et sa gestion est complexe : 75 % de la forêt française appartient à des propriétaires privés, avec des parcelles souvent trop petites.

Il convient de favoriser l'utilisation des grands arbres comme matériau de construction, de veiller au renouvellement des espèces d'arbres pour mieux résister aux ravageurs et aux sécheresses provoquées par le changement climatique et d'élaborer des outils permettant de mesurer le stockage de CO₂ par les végétaux.

8.2. Captage artificiel, stockage et valorisation du CO₂

Le CCS avec éventuellement l'utilisation du carbone est un *game changer* de la décarbonation de l'économie et en particulier de l'industrie. De grands industriels et des centres de recherche français sont à l'avant-garde des travaux de R&D. Cependant, les technologies de captage restent coûteuses car elles consomment en général beaucoup d'électricité. Il convient de poursuivre les efforts de R&D pour réduire les coûts et développer l'utilisation du carbone (matériaux, produits chimiques...). Une législation incitative favoriserait les investissements.

Conclusion

Globalement, pour la France et l'Europe, la transition énergétique, qui demande d'énormes moyens, se heurte à un manque de capital humain et financier. Les bouleversements en cours risquent de favoriser les dominations asiatique et américaine, de sorte qu'une réaction à l'échelle européenne s'impose, sans négliger les répercussions sur les balances de paiement et l'emploi.

La France a des atouts mais elle va devoir mieux définir sa position et l'affectation de son potentiel, notamment en R&D, pour relever le double défi de contribuer à l'effort mondial de lutte contre les émissions de CO₂ et de gagner en compétitivité.

Le paysage industriel est en pleine évolution. La production d'énergie, les véhicules, les carburants de synthèse, le CCS, la «chimie verte», les circuits intégrés et l'électronique de puissance vont de plus en plus être l'affaire de grands groupes. Plusieurs disposent en France de forces importantes de R&D et de production et sont très présents à l'étranger. Ils pourront s'appuyer sur un tissu de start-up innovantes.

Il est important que la recherche publique soit couplée avec ces groupes et consacre davantage de forces au progrès des technologies dominantes. Quelques grands laboratoires français

sont parmi les meilleurs mais la recherche académique se disperse beaucoup et n'a pas la culture de la propriété industrielle.

Les pistes de *game changers* proposées par le groupe de travail demandent à être travaillées avec les parties prenantes concernées en vue de favoriser leur appropriation et d'en assurer la bonne intégration dans les écosystèmes locaux.

Il faut souligner les enjeux d'approvisionnement en matériaux critiques (minerais, métaux) et en eau, qui apparaissent à de multiples reprises comme stratégiques dans les *game changers* identifiés.

Enfin, ces *game changers* devront être régulièrement confrontés aux progrès techniques et à l'évolution de l'industrie française et européenne.

NOTES

1. Le dernier en date a été publié en janvier 2023 : <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2023>.
2. Voir notamment «Captage, stockage et utilisation du carbone», *Annales des mines, Responsabilité et Environnement*, n° 105, janvier 2022 (en libre téléchargement sur le site des *Annales des mines*).

RÉFÉRENCE

ANRT, 2023. *Game changers*, pour la transition énergétique, <https://www.anrt.asso.fr/fr/actualites/game-changers-pour-la-transition-energetique-dici-2030-2050-36798>.

BIOGRAPHIES

Diplômé de l'École Polytechnique et ingénieur des Mines, **OLIVIER APPERT** a occupé des fonctions de direction dans des administrations et des entreprises, essentiellement dans le domaine de l'énergie et de la technologie, et aussi à l'AIE de 1999 à 2003. De 2003 à 2015, il a été président-directeur général de IFP Energies Nouvelles. Il a présidé le Conseil Français de l'Énergie de 2010 à 2018 et est aujourd'hui conseiller du centre énergie de l'Ifri et membre de l'Académie des technologies.

FÉLIX ELEFANT, diplômé de l'université de Cambridge et de CentraleSupélec, a commencé sa carrière comme ingénieur de recherche au CEA, au sein de l'Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'univers (IRFU). Auteur de brevets internationaux, il est à l'initiative de plusieurs projets de recherche, et il a cofondé deux start-up, dans le domaine de la production et la transformation de l'énergie. En marge de ses activités de CTO, il effectue des missions de conseil en prospective, et il achève actuellement un doctorat au LHEEA, un laboratoire d'énergétique du CNRS.

RICHARD LAVERGNE est Ingénieur général honoraire du Corps des Mines, X75. Depuis 2021, il est membre associé du Conseil général de l'économie (ministère de l'Économie et des Finances). Il a été conseiller à la fois du Directeur général de l'énergie et du climat (DGEC) et de la Commissaire générale au développement durable (CGDD) au sein du ministère de l'Écologie. Il a été directeur de l'Observatoire de l'énergie et des matières premières.

DENIS RANDET a fait la plus grande partie de sa carrière au CEA, où il a dirigé le LETI, un des principaux laboratoires mondiaux de microélectronique et micro-technologies, puis créé CEA Valorisation. Ensuite, il a dirigé l'ANRT, où il a lancé l'opération FutuRIS, afin de rassembler recherche publique et entreprises dans la construction de visions prospectives communes. Il est Ingénieur général de l'armement, docteur ès sciences.

À lire également dans *La Revue de l'Énergie*

- Les petits réacteurs modulaires, une nouvelle ère nucléaire? Approche géopolitique et stratégique, *Michel Derdevet, Nicolas Mazzucchi (n° 657, juillet-août 2021)*
- Captage et stockage du CO₂ : la technologie pour contribuer à réduire les émissions de CO₂?, *François Carême (n° 665, novembre-décembre 2022)*
- Le développement des usages de l'hydrogène décarboné en France : point de situation et enjeux de sécurité, *Isabelle Wallard, Michel Rostagnat (n° 666, mai-juin 2023)*
- Biomasse et neutralité carbone : méthode d'aide à la décision pour les choix publics et privés, *Monique Axelos, Patrice Geoffron, Pierre Vaiss (n° 666, mai-juin 2023)*

À retrouver sur www.larevuedelenergie.com.