

VERS UNE ÉNERGIE ZÉRO CARBONE EN 2050 : COMMENT CELA SERA-T-IL POSSIBLE ?

Danièle Olivier

Parties des programmes de physique-chimie et d'enseignement scientifique associées

Programme d'enseignement scientifique de terminale générale :

- ▶ thème 1 : sciences, climat et société ;
- ▶ thème 2 : le futur de l'énergie.

Programme de physique-chimie et mathématiques de terminale STL2D : énergie-énergie chimique.

Programme de physique-chimie et mathématiques de terminale STL : énergie, conversion et transfert, énergie électrique.

Mots-clés : énergie, politique énergétique, prospective, décarbonation de l'énergie, transition énergétique, réchauffement climatique, nouvelles technologies.

INTRODUCTION

En 2019, les débats sur la transition énergétique étaient déjà très nombreux, les enjeux principalement environnementaux portant au premier rang sur la lutte contre le changement climatique. Il faut maintenant tenir compte des modifications apportées par la pandémie de COVID-19 et de ses conséquences économiques et sociales.

Pour le Conseil Mondial de l'Énergie il y a trois objectifs principaux :

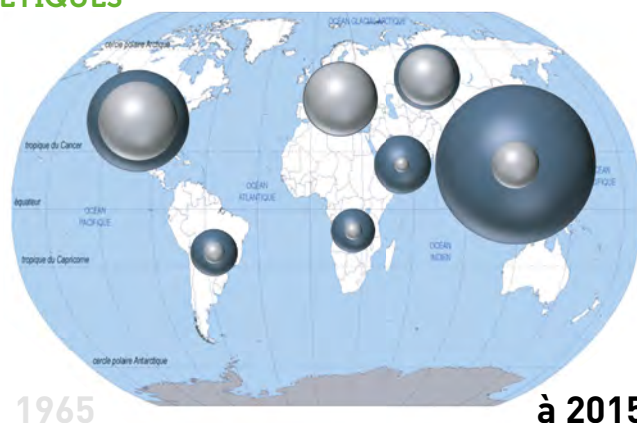
- ▶ *l'accès physique à l'énergie* : ce qui n'est pas toujours le cas dans les pays en développement, auquel il faut ajouter comme c'est le cas actuellement dans les pays développés, *la précarité énergétique* ;
- ▶ *la sécurité des approvisionnements énergétiques* qui peut dépendre de risques géopolitiques et de *l'accessibilité à certaines matières premières* comme on peut le voir actuellement ;
- ▶ *l'acceptabilité environnementale associée* à la lutte contre le changement climatique mais aussi à la perte de la biodiversité, aux pollutions locales et à la montée du stress hydrique.

Mais il ne faut pas oublier *l'acceptabilité sociale de la politique mise en œuvre et ses conséquences économiques et sociales.*

ÉVOLUTION DES CONSOMMATIONS ÉNERGÉTIQUES

Comme le montre l'évolution des émissions de CO₂ dans le monde entre 1965 et 2015 (Figure 1), la carte mondiale de l'énergie a fortement changé. Pour l'Europe et l'Amérique du Nord, les bulles grises (1965) et bleues (2015) sont assez proches. Ce n'est pas le cas en Afrique et au Moyen-Orient et surtout en Asie pacifique où elles ont explosé.

Figure 1 – L'évolution des émissions de CO₂ dans le monde entre 1965 (gris clair) et 2015 (bleu foncé) montre une forte augmentation dans diverses régions.



Les pays développés ont été les premiers responsables de l'augmentation des gaz à effet de serre, mais la géopolitique des émissions fait que l'Europe n'est plus responsable actuellement que d'environ de 9,7 % des émissions. *En 2019, les émissions mondiales de CO₂ étaient de 34 gigatonnes dont 12 pour les pays de l'OCDE et 22 pour les autres.*

De 2018 à 2019, la France a diminué ses émissions de 307 Mt à 299 Mt tandis que dans le même temps, la Chine a augmenté ses émissions de 9,5 Gt à 9,8 Gt soit l'équivalent du total des émissions de la France.

Donc, même si nous devons faire des efforts dans les pays industrialisés, le vrai combat contre le changement climatique va se gagner ailleurs qu'en Europe. L'inertie du système énergétique est illustrée dans la Figure 2.

Il y a trois catégories d'énergie : le nucléaire, les énergies renouvelables et les énergies fossiles. Si l'on dessine le cheminement de la composition du bouquet énergétique mondial de 1967 à 2017 (voir le zoom), le point reste bien calé dans le coin des énergies fossiles.

Le Conseil Mondial de l'Énergie a construit trois scénarios possibles de transition énergétique en prenant en compte un certain nombre de conditions ainsi définies (Figure 3).

Le scénario modern jazz : coopération et innovation dans un monde de marché.

Le scénario symphonie inachevée : coopération et innovation dans un monde de politique publique.

Le scénario hard rock : fragmentation et innovation dans un monde à la fois politique publique et de marché.

Quel que soit le scénario de modélisation utilisé, la consommation d'énergie primaire par habitant doit diminuer (Figure 4) mais c'est le scénario *symphonie inachevée* qui est le plus favorable à long terme.

La production d'électricité est un enjeu important de la transition énergétique : la Figure 5 montre qu'elle doublera d'ici 2060 dans les trois scénarios, ce qui fait de l'électricité un enjeu important des transitions énergétiques.

Les énergies fossiles les plus communes sont le charbon, le pétrole et le gaz. Les prévisions des demandes au niveau mondial prévoient que celles des deux premières diminuent mais pas celle du gaz qui devrait même connaître un certain déploiement, sauf en Europe.

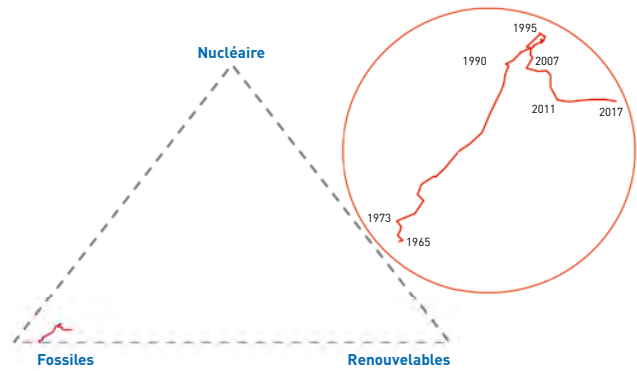


Figure 2 – Évolution de la composition du bouquet énergétique mondial entre 1965 et 2017.

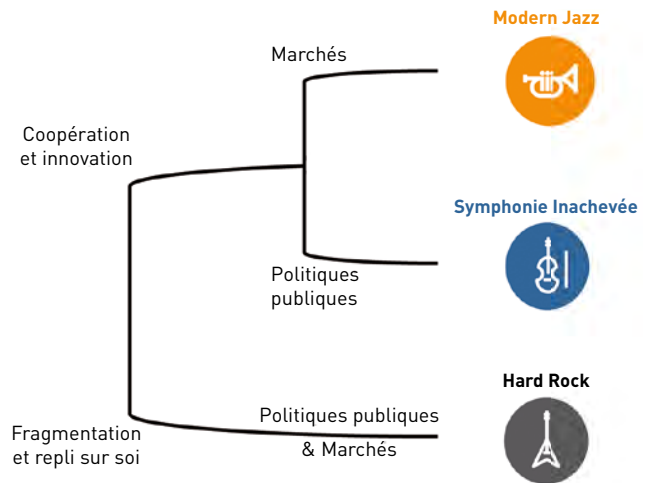


Figure 3 – Les conditions prises en compte par le CME pour élaborer les différents scénarios de la transition énergétique.

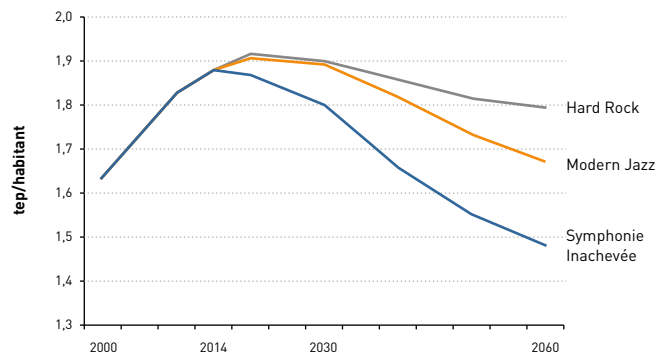


Figure 4 – La consommation d'énergie primaire par habitant va diminuer d'après les prédictions du CME et ce, quel que soit le scénario.

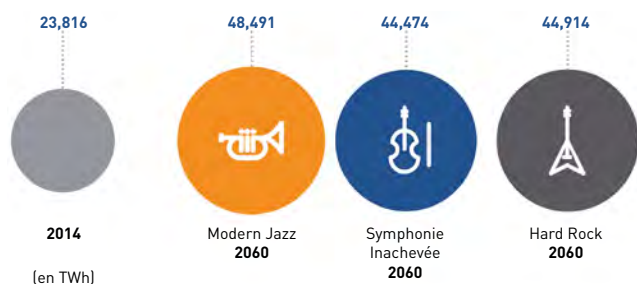


Figure 5 – Dans les trois scénarios du CME, la production d'électricité double d'ici 2060, ce qui fait de l'électricité un enjeu important des transitions énergétiques.

C'est le scénario *symphonie inachevée* dans lequel l'innovation et la coopération sont initiées par les politiques publiques qui utiliseraient le moins d'énergies fossiles en 2060 avec 24 % de gaz, 22 % de pétrole et 5 % de charbon.

Cependant, la crise du COVID apporte des incertitudes qui peuvent faire évoluer ces scénarios.

La première incertitude est celle de la **santé**, à la fois sur la durée de la pandémie et sur l'anticipation de risques futurs.

La seconde est l'**économie** : les acteurs économiques auront-ils les capacités économiques et financières pour reprendre les investissements nécessaires à la transition énergétique ?

La troisième incertitude est la **gouvernance**. L'intérêt croissant des citoyens pour s'impliquer dans les décisions locales passera par une information plus complète et peut-être par une redéfinition du rôle des experts et de la manière de débattre. Cela implique des progrès en termes d'éducation afin de pouvoir former des citoyens plus responsables.

LE DÉFI DE L'ÉNERGIE ZÉRO CARBONE

L'urgence climatique impose la mise en œuvre sans délais de nouvelles technologies matures, prêtes au déploiement industriel

Trois catégories de sources énergétiques répondent à ce critère :

- ▶ les énergies renouvelables et notamment l'hydroélectricité ;
- ▶ le nucléaire ;
- ▶ certaines énergies fossiles qui à court ou moyen terme pourraient jouer un rôle si elles sont associées à des techniques de captage, d'utilisation et de stockage du carbone.

Du côté de la demande énergétique, il faut développer les efforts dans le sens d'*une plus grande efficacité énergétique* comme par exemple l'isolation de l'habitat, et ce même si on se heurte à un manque de compétences disponibles au niveau des artisans.

Le fait de ne promouvoir à court terme que des technologies matures ne veut pas dire qu'il ne faut pas s'intéresser aux technologies du futur.

La géopolitique des émissions fait que la lutte contre le changement climatique ne se gagnera qu'en accompagnant les pays en développement et *il faut prévoir des transferts de technologie et promouvoir des transferts de compétences.*

L'innovation technologique

Les trois quarts des réductions d'émissions nécessaires d'ici 2050 seront issues de technologies qui sont encore à un stade peu mature ou à l'état de prototype (Figure 6).

Nous sommes au début d'une nouvelle décennie de haute technologie pour accompagner le défi de l'énergie zéro carbone dans les domaines suivants : l'efficacité énergétique, la décarbonation de l'électricité, l'électrification – là où c'est possible –, la gestion des secteurs difficiles à décarboner ou à électrifier, la capture ou l'extraction du carbone là où c'est complémentaire et nécessaire et enfin, la disposition des matériaux qui vont servir cette transition énergétique.

L'efficacité énergétique

Elle intervient partout dans les transports, les bâtiments et l'industrie.

Dans *les bâtiments*, des progrès colossaux sont à faire dans l'isolation thermique. Beaucoup d'innovations portent sur de nouvelles technologies de construction et de préfabrication pour simplifier l'isolation par l'extérieur.

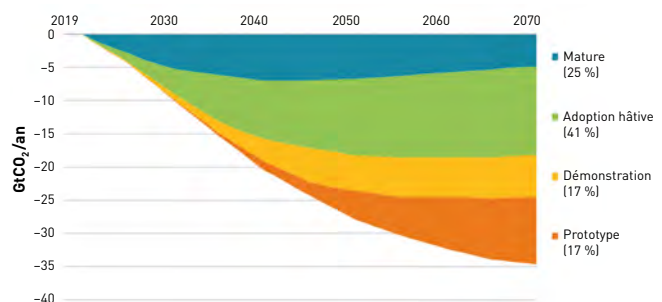


Figure 6 – Réductions attendues des émissions de CO₂ selon le stade d'évolution des différentes technologies utilisées.
Source : d'après IEA, 2020.

Dans l'industrie il existe des technologies dont on entend encore peu parler comme celles qui concernent les nouvelles membranes à base de graphène qui permettent de remplacer des processus de séparation thermique par un processus mécanique qui réduit la facture énergétique de procédés industriels complexes.

La décarbonation de l'électricité

L'électricité représente 20 % de la demande en énergie. La Figure 7 représente la carte de l'électricité bas carbone en Europe. En France, nous avons la chance d'avoir une électricité bas carbone notamment grâce au nucléaire et un peu aussi grâce à l'hydroélectricité.

Il est important de rappeler que bien que décriée, l'électricité nucléaire joue en France un rôle fondamental puisqu'elle permet de fournir une énergie non intermittente très bas carbone y compris là où les réseaux hydroélectriques ou géothermiques ne sont pas en abondance. Nous disposons en France de toutes les technologies de réacteurs :

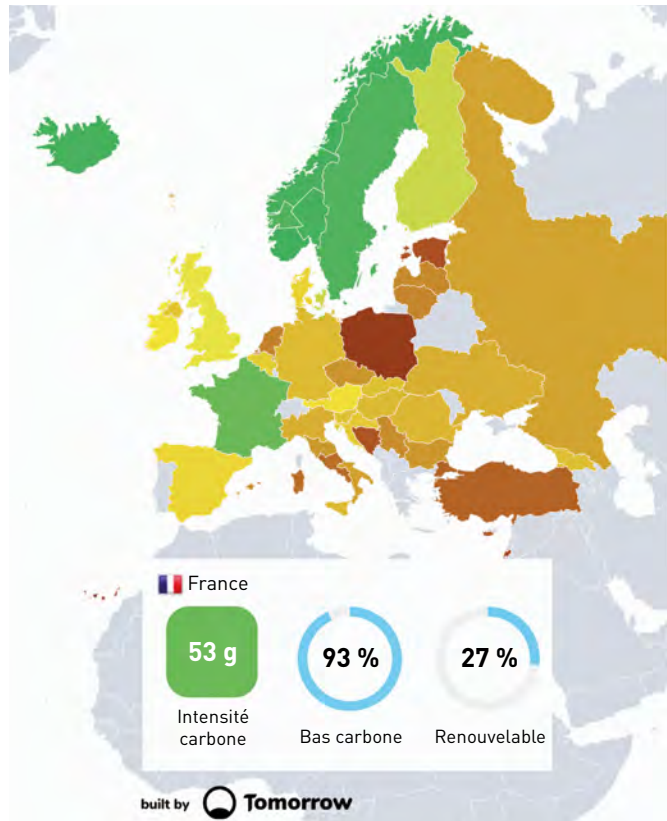


Figure 7 – Carte européenne de l'électricité bas carbone.

- ▶ l'EPR (même si les prochaines générations de très grande taille prennent parfois du retard) est un réacteur à eau pressurisée de 3^e génération dont la puissance nette atteint près de 1 660 MW. Ce réacteur a un meilleur rendement que les réacteurs actuels et dispose de systèmes redondants de sûreté ainsi que d'une épaisse enveloppe de confinement en béton. L'EPR devrait être capable d'utiliser 100 % de combustible MOX (mélange d'oxydes d'uranium et de plutonium qui permet de recycler une partie des matières nucléaires) pour produire de l'électricité. À l'heure actuelle, 2 EPR sont en service en Chine et 4 autres sont en construction en France (Flamanville 3), en Finlande (Olkiluoto 3) et au Royaume-Uni (Hinkley Point C) ;
- ▶ une nouvelle vague de développement technologique avec les nouveaux réacteurs plus compacts – les petits réacteurs modulaires SMR – qui coûtent moins cher à fabriquer et à déployer. Depuis 2017, l'État français développe un SMR de 170 MW à eau pressurisée baptisé « Nuward ». Fruit d'une collaboration entre le Commissariat à l'Énergie Atomique, l'électricien EDF, le groupe naval militaire Naval Group et le spécialiste des réacteurs compacts (notamment pour l'industrie navale), il aurait vocation à assurer le remplacement des centrales thermiques fossiles. Initialement prévu pour l'export, EDF a d'ores et déjà évoqué la construction d'un prototype en France.

Les énergies renouvelables intermittentes que sont le solaire et l'éolien ont énormément d'avantages, à savoir que les coûts ont drastiquement diminué et qu'elles sont rapides à déployer. Mais le problème est le stockage énergétique de longue durée pour lequel les batteries au lithium ne sont pas encore compétitives. Plusieurs technologies de stockage longue durée non matures sont en cours de développement :

- ▶ le stockage mécanique qui consiste à reproduire un stockage sous forme de gravité à la manière du pompage-turbinage dans lequel l'eau est remontée d'un bassin à l'autre pour être accumulée dans ce dernier, mais réalisé avec d'autres éléments comme des blocs de béton ;
- ▶ le stockage thermique : par exemple, dans des matériaux à changement de phase ou avec des pompes à chaleur réversible ;
- ▶ le stockage électrochimique dans lequel les batteries à flux ont un regain d'intérêt. La flexibilité de ces nouvelles batteries « redox vanadium » devrait permettre de les adapter aux installations renouvelables comme les parcs solaires ou les parcs éoliens à différentes échelles. Contrairement aux batteries lithium-ion, les batteries « redox vanadium » ne maintiennent pas un rapport énergie/puissance fixe (c'est-à-dire le rapport entre la puissance pouvant entrer ou sortir de la batterie par rapport à la quantité d'énergie pouvant être stockée). L'électrolyte est stocké dans deux réservoirs distincts reliés à un réacteur où les

électrons peuvent être échangés. La tension est contrôlée par les électrodes des cellules et la capacité totale de la batterie est déterminée par la taille des réservoirs. L'ajout de cellules électrochimiques supplémentaires et l'augmentation de la quantité de solution d'électrolyte permettent respectivement d'augmenter la puissance et d'accroître la capacité de stockage de la batterie à flux « redox vanadium » ;

- *le stockage chimique* avec le « Power to X » c'est-à-dire la transformation de l'électricité en un autre vecteur énergétique ou le « Power to gas » en s'appuyant sur l'hydrogène ou d'autres procédés

La décarbonation des secteurs énergétiques non électrifiés

Ces secteurs représentent 80 % des besoins énergétiques, ils concernent :

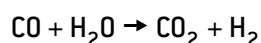
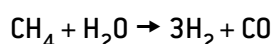
1 – les usages pour lesquels on a besoin d'une forte densité énergétique mais où la fourniture de l'énergie est décentralisée : véhicules légers et chauffage résidentiel. L'électrification avec le développement des batteries et des pompes à chaleurs sont les moyens les plus adaptés de décarbonation ;

2 – les usages pour lesquels on a besoin de beaucoup de puissance et aussi d'une forte densité énergétique : la chaleur industrielle, les véhicules lourds, les transports longue distance et les secteurs de l'acier et du ciment ;

3 – les usages où les énergies fossiles fournissent à la fois de la chaleur mais aussi des réactifs matière première.

Dans les cas 2 et 3, les carburants fossiles sont actuellement la principale source d'énergie. *La solution de décarbonation sera dans certains cas l'électrification, dans beaucoup de cas l'hydrogène ou d'autres carburants de synthèse mais aussi la capture du carbone au point d'émission dans les usines ou les centrales.*

Mais l'hydrogène est aujourd'hui, pour plus de 95 %, produit par le vaporeformage catalytique du gaz naturel selon les réactions.



C'est donc encore une énergie carbonée. Il faut donc penser à la **production de l'hydrogène vert par l'électrolyse de l'eau** pour le moyen et long terme qui est actuellement la technologie prometteuse la plus avancée.

Mais il faut savoir qu'il existe une très grande diversité d'autres chemins possibles pour la production d'hydrogène bas carbone (Figure 8) utilisant des voies biologiques ou des procédés thermodynamiques.

Le coût de la décarbonation

Toutes les solutions de décarbonation de l'énergie ont un coût parfois très important et ce coût augmente beaucoup avec la quantité de CO₂ à éliminer (Figure 9).

Les matériaux de la transition énergétique : leur approvisionnement sera un facteur critique

On sait aujourd'hui que la demande en cuivre, nickel, lithium, manganèse et terres rares commence à exploser du fait du développement des énergies renouvelables et du marché des véhicules électriques et des batteries.

Il faut savoir faire face non seulement à une possible pénurie mais aussi veiller à ce que leur production ne détruise pas des pans entiers de biodiversité du fait des exploitations minières qui y sont associées.

On peut décider du point de vue stratégique de réserver les énergies très consommatrices en métaux là où c'est vraiment nécessaire et utiliser le nucléaire et la géothermie qui sont tous deux en train d'évoluer.

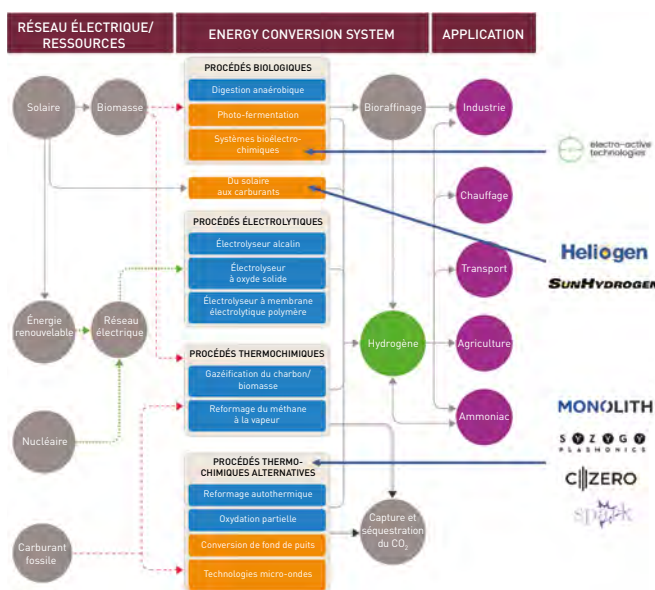


Figure 8 – L'hydrogène bas carbone : options de production et applications.

VERS UNE ÉNERGIE ZÉRO CARBONE EN 2050 : COMMENT CELA SERA-T-IL POSSIBLE ?

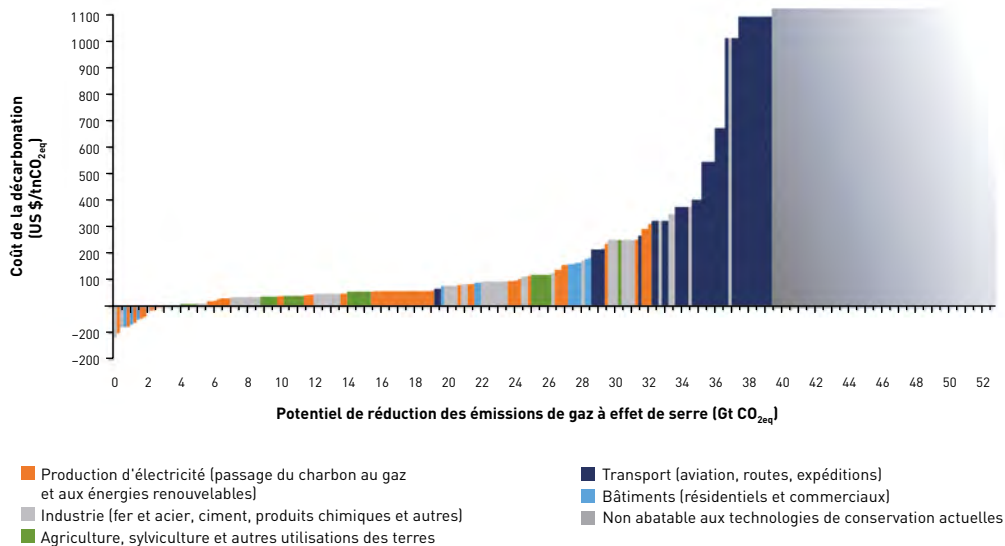


Figure 9 – Le coût de la décarbonation selon les secteurs énergétiques concernés et selon la quantité de CO₂ à éliminer.
Source : d'après Goldman Sachs Investment Research.

Par ailleurs, l'intelligence artificielle sert déjà pour identifier de nouveaux gisements et pour les exploiter de façon plus durable ; quelques acteurs se positionnent mais les applications ne sont pas encore matures.

Les émissions négatives de carbone : élimination au point d'émission

Au-delà du temps et des moyens financiers, cela ne suffira pas ; il sera nécessaire d'éliminer le carbone au point d'émission pour soit le stocker, soit le réutiliser dans des produits de longue durée tels que les matériaux de construction. Il faudrait éliminer entre 5 et 20 millions de tonnes par an pour tenir les objectifs des Accords de Paris. Il existe deux voies possibles :

- ▶ la photosynthèse avec la restauration d'écosystèmes naturels, l'utilisation de technologies à base d'algues et la biologie de synthèse ;
- ▶ les procédés purement physiques et chimiques à base de capture de CO₂ ou l'utilisation de roches alcalines pour le stockage longue durée sous forme de carbonates.

L'acceptabilité des nouvelles technologiques

Il faut mettre en avant les limites de ce qui est physiquement possible, ce qui contraste avec les discours souvent trop optimistes. Plusieurs points sont fondamentaux.

Le développement de l'infrastructure nécessaire pour exploiter une nouvelle énergie se fait avec les énergies à notre disposition et il ne peut en être autrement tant que la part d'énergie bas carbone est faible dans le bouquet énergétique primaire. La Figure 10 de l'évolution de la consommation mondiale par source d'énergie entre 2000 et 2019 montre que même si les énergies renouvelables (photovoltaïque et éolien) sont en forte croissance, elles restent très minoritaires par rapport aux énergies fossiles qui continuent à augmenter alors que les espoirs de décarboner la production électrique reposent actuellement sur les renouvelables dont il faudrait tripler la capacité de production en neuf ans, même en supposant que la demande reste constante.

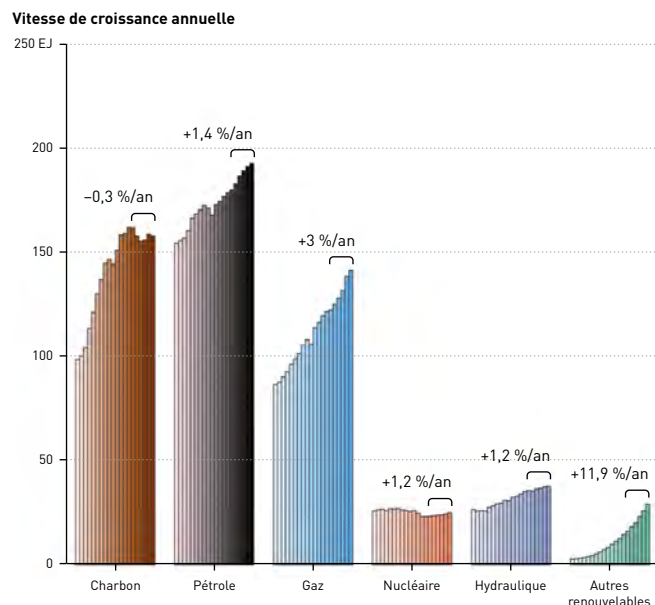


Figure 10 – Évolution de la consommation d'énergie mondiale annuelle entre 2000 et 2019 par source.
Source : BP 2020 ; Jackson et coll., 2019 ; Global Carbon Budget, 2020.

Cela signifie également qu'il faudra fermer les centrales à charbon et donc gérer les reconversions de personnels qui se retrouveront sans emploi. Cela demande une politique volontariste forte des états et cela alors même qu'il s'en construit de nouvelles dans le monde.

L'importance de la densité de puissance

La densité de puissance est importante car elle implique des contraintes spatiales qui peuvent être compliquées (Figure 11). Ce point est particulièrement important à considérer pour l'implantation des énergies renouvelables. La densité de puissance nécessaire est proportionnelle à la densité de population et depuis 2008, plus de 50 % de la population mondiale vit dans des villes et ce chiffre est en hausse.

Par exemple, pour subvenir aux besoins de Paris avec des panneaux solaires, il faudrait une surface de 4,5 à 45 fois plus grande que la ville !

La densité de puissance a un impact sur l'occupation des sols et la biodiversité.

Les matériaux énergétiques

Les faibles densités de puissance ont un impact sur les quantités de matériaux nécessaires pour construire l'infrastructure. La Figure 12 montre les quantités d'acier et de béton nécessaires pour les différentes sources d'énergie. Une centrale à charbon nécessite 50 tonnes d'acier par MW produits, l'éolien *in shore* 150 tonnes et le *offshore* 300 tonnes. Le nucléaire grâce à sa forte densité de puissance est proche des énergies fossiles.

L'acier représente 8 % de la consommation mondiale d'énergie primaire, devançant ainsi dans les matériaux énergétiques les plastiques, le ciment et le papier. Le remplacement des moyens de production actuels d'acier et de ciment par des procédés bas carbone prendra du temps.

L'acceptabilité sociale et l'information

Une technologie peut être idéale sur le papier, elle ne permettra pas de répondre au défi climatique si elle rencontre une très forte opposition liée à un manque d'informations objectives.

L'exemple le plus représentatif est certainement le nucléaire pour lequel à un sondage des populations pour savoir si le nucléaire contribue peu, un peu ou beaucoup à l'effet de serre, 70 % des sondés considèrent qu'il contribue un peu ou beaucoup, ce qui est faux ! La raison est que le sujet est peu abordé dans la scolarité et donc, mal compris.

Il en est de même pour l'éolien pour lequel l'opposition aux installations est grandissante.

L'information objective est importante. Il existe un florilège de titres de presse qui donne l'impression que toutes les technologies nécessaires existent et pourront être développées ainsi que des articles exagérant la portée d'une découverte vouée à retomber ensuite dans l'indifférence.

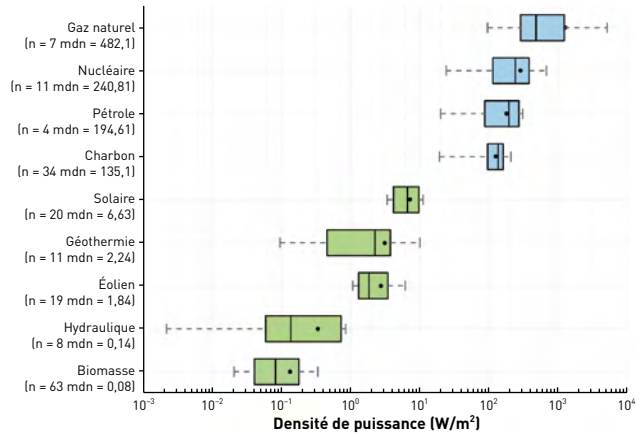


Figure 11 – Densités de puissance des différents types de production d'énergie.
Source : J. Van Zalk, Energy Policy, 123 (2018).

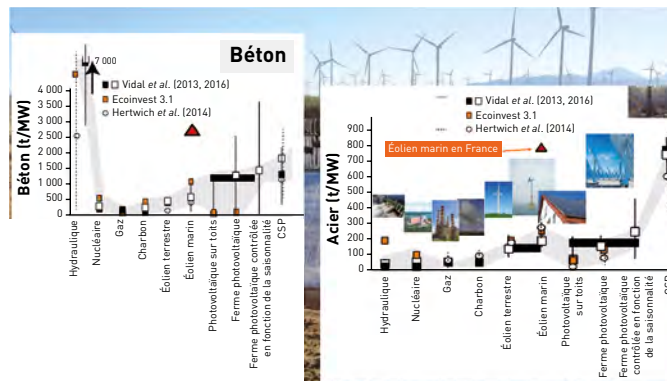


Figure 12 – Consommation de béton [A] et d'acier [B] pour les différentes sources d'énergie, tonnes de matériaux consommés par MW d'énergie produite.
Source : Goffé B., 2017

CONCLUSION

Changer radicalement l'infrastructure énergétique pour limiter le changement climatique implique de tourner le dos aux combustibles fossiles qui ont permis de développer la société industrielle que nous connaissons ; cela inclut tous les transports, toute l'électricité, tous les usages ménagers et tous les usages industriels.

Ce qu'il est nécessaire de réaliser n'a pas de précédent dans l'histoire : il faut avoir conscience des difficultés scientifiques, technologiques, économiques et sociétales que cela implique.

SOURCES PRINCIPALES

Conférences de :

- ▶ Jean-Eudes Moncomble : « Un an après la crise, quel paysage de l'énergie en 2050 ? » ;
- ▶ Benjamin Tincq : « Des *clean tech* aux *climate tech* : vers une énergie zéro carbone ? » ;
- ▶ Gregory de Temmerman : « Vitesse de déploiement et acceptabilité des nouvelles technologies dans le domaine des énergies ».

<https://www.mediachimie.org/actualite/colloque-chimie-et-energies-nouvelles>

Danièle Olivier, vice-présidente de la Fondation de la Maison de la chimie est agrégée de physique-chimie, professeur d'université, directrice de l'ENS Chimie Paris-Tech de 1997 à 2006

Comité éditorial : Danièle Olivier, Jean-Claude Bernier, Grégory Syoen