

*Urgence climatique:  
peut-on se passer  
de l'énergie nucléaire?*



**La Société française d'énergie nucléaire** est le carrefour français des connaissances sur l'énergie nucléaire. Créée en 1973, la SFEN est un lieu d'échanges pour celles et ceux qui s'intéressent à l'énergie nucléaire et à ses applications. Elle compte 3 600 membres. Ses quinze sections techniques rassemblent les spécialistes des différents domaines de l'énergie nucléaire.

**Nuclear for Climate** est une initiative créée en 2015 par la SFEN, l'European Nuclear Society et l'American Nuclear Society. Elle rassemble aujourd'hui 150 associations nucléaires à travers le monde. Son objectif est de faire reconnaître le nucléaire comme une partie de la solution dans la lutte contre le changement climatique.



Contributions de la SFEN  
à la Programmation pluriannuelle de l'énergie  
et à la COP24 (Katowice, Pologne, décembre 2018)

# Éditorial

L'urgence climatique est le défi majeur de l'Humanité. En dépit des engagements pris à la COP21, les émissions de gaz à effet de serre, au lieu de diminuer, ne cessent d'augmenter, y compris en France. D'après le dernier rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), la limite de 1,5 °C, fixée pour 2100 dans l'accord de Paris, serait atteinte entre 2030 et 2051. Nous ne sommes pas sur la bonne trajectoire. Nous sommes en train de perdre la bataille climatique.

La France est pourtant un pays exemplaire, qui a réussi à atteindre une performance remarquable : avoir les plus faibles émissions par habitant des sept pays les plus développés (G7). En France, prendre le train à grande vitesse ou recharger son téléphone n'a pas d'impact sur le climat.

Notre pays y parvient grâce à son parc nucléaire, qui fournit massivement une électricité décarbonée. Mais la France peine à réduire ses émissions car ses investissements portent sur le secteur électrique et non sur les secteurs les plus consommateurs d'énergies fossiles (pétrole, gaz), et donc les plus émetteurs de gaz à effet de serre, comme le transport et l'habitat. Il faudrait peut-être interroger cette stratégie, et concentrer les efforts là où des résultats tangibles, du point de vue de l'urgence climatique, pourraient être atteints. Par exemple, en tirant parti de l'électricité décarbonée pour développer la mobilité électrique. L'Allemagne, qui a fait le choix de l'arrêt du nucléaire, investit des centaines de milliards d'euros sans parvenir à réduire ses émissions. Ce que l'Allemagne, avec son niveau de développement, ses ressources financières, et son accès à la technologie, échoue à faire, qui pourrait y arriver ?

Se pose donc pleinement la question de la contribution que l'énergie nucléaire peut apporter à la lutte contre le changement climatique. Nous avons la conviction qu'il ne sera pas possible de ralentir les émissions de gaz à effet de serre sans que les pays qui disposent de la technologie nucléaire ne développent

ou ne renouvellent leur parc. Ce sera vrai en France, où des décisions s'imposent. Ainsi qu'en Chine et en Inde où l'énergie nucléaire constitue d'ores et déjà une alternative à l'essor du charbon.

Nous sommes bien conscients que l'énergie nucléaire suscite des débats passionnés et des inquiétudes... Les accidents majeurs ont marqué l'opinion. Les citoyens s'interrogent sur la gestion des déchets radioactifs. Pourtant, du stockage géologique des déchets au contrôle par une autorité de sûreté indépendante, des solutions existent.

Cependant, nous pensons qu'il serait irresponsable de se priver d'une solution ayant fait ses preuves. La menace du changement climatique et les dommages qu'il commence de produire doivent nous inciter à agir avec pragmatisme. Cette note a l'ambition de poser les données du débat avec objectivité. Chacun pourra ainsi étudier notre raisonnement, et peut-être en tirer les mêmes conclusions que nous. La communauté nucléaire sera alors prête à relever le défi.

**Valérie Faudon**  
**Déléguée générale de la SFEN**

## Résumé

La France s'est fixée à la fois une ambition nationale et internationale dans la lutte contre le changement climatique. Trois ans après la COP21, et l'accord mondial sur l'objectif de limiter le réchauffement à 1,5 °C en 2100, le dernier rapport du GIEC alerte que la limite pourrait être atteinte entre 2030 et 2050. En France aussi, si le Plan climat a fixé un objectif de décarbonation à 2050, les émissions ont encore augmenté de 4 % en 2017.

### **Le nucléaire est une source d'énergie bas carbone reconnue**

La même méthodologie (ACV) est utilisée aujourd'hui dans tous les secteurs pour calculer le bilan environnemental d'un service ou d'un produit. Le GIEC établit la médiane des émissions du nucléaire au niveau mondial à 12 g/kWh. En France, les émissions se situent dans la fourchette basse (jusqu'à 4-5 g/kWh selon certaines études), en raison du faible contenu carbone de l'électricité utilisée pour l'étape d'enrichissement.

### **L'efficacité de l'énergie nucléaire à réduire les émissions de gaz à effet de serre est démontrée**

L'énergie nucléaire est industriellement disponible et déployable à grande échelle, avec 455 réacteurs en opération aujourd'hui dans 30 pays différents. Sa production était en légère augmentation en 2017 et représentait 10,3 % de la production mondiale d'électricité. Depuis 1970, elle a permis d'éviter le rejet de plus de 60 Gt de CO<sub>2</sub> dans le monde, soit l'équivalent de cinq années d'émission de CO<sub>2</sub> du secteur électrique. Ceci en fait la deuxième énergie bas carbone contributrice derrière l'hydroélectricité. À l'exception de la Norvège, les pays européens qui ont réduit rapidement leurs émissions dans le secteur électrique (Suède, Suisse, France), combinent énergie nucléaire et hydroélectricité. Grâce à l'énergie nucléaire, la France est le plus décarboné (en émissions par habitant) des sept plus grands pays industrialisés (G7). Enfin, l'analyse du programme nucléaire suédois à partir de 1972 démontre la capacité du nucléaire à décarboner rapidement le système électrique : les émissions par habitant ont baissé de 75 % en moins de vingt ans.

**A contrario, les mises à l'arrêt de centrales nucléaires ont abouti à une stagnation, voire une augmentation, des émissions de gaz à effet de serre** États-Unis, Europe, Japon : plusieurs pays ont vu des fermetures de centrales ces dernières années. Malgré d'importantes ressources financières et l'accès

à la meilleure technologie, les politiques menées se révèlent inefficaces, voire contre-productives au plan climatique. En Californie, dans le Vermont, dans le New Jersey, on voit, avec des fermetures prématurées de centrales, que c'est le gaz de schiste, fortement émetteur de gaz à effet de serre, mais pilotable, qui se substitue à l'énergie nucléaire bas carbone. En Allemagne, malgré des investissements massifs (25 milliards d'euros par an), la part du charbon, l'énergie la plus polluante, est restée stable : le pays n'atteindra pas ses objectifs climatiques. Le Japon, avec le trop lent redémarrage des réacteurs nucléaires, reste le premier acheteur mondial de gaz liquéfié : ses électriciens montrent même un nouvel intérêt pour le charbon. En France, le scénario prévisionnel RTE pour 50 % de nucléaire en 2025 aurait nécessité de garder quatre centrales à charbon et de construire vingt nouvelles centrales à gaz. Alors que plus de 80 % de la dépense publique pour les énergies renouvelables reste focalisée sur le secteur électrique, très faiblement émetteur, plutôt que sur des secteurs fortement émetteurs, comme le chauffage, le pays est encore sorti, pour la troisième année consécutive, de sa trajectoire fixée par la stratégie bas carbone.

### **Le nucléaire sera indispensable, au côté des énergies renouvelables, pour atteindre les objectifs de décarbonation**

La décarbonation du secteur électrique est au cœur des enjeux climatiques : l'électricité représente 40 % des émissions totales, et est encore dominée par le charbon et le gaz (63 % du total). Des solutions bas carbone sont disponibles. Décarboner l'électricité représente pourtant un défi considérable. Les derniers scénarios fixent maintenant la barre très haut, visant une décarbonation totale du système électrique à l'horizon 2050, alors qu'on s'attend en même temps, en raison de la croissance démographique et du rattrapage des pays émergents, à un doublement de la consommation électrique. En dépit d'investissements massifs, les énergies renouvelables ne suffisent pas à elles seules à soutenir le rythme de décarbonation nécessaire. Les institutions internationales (OCDE-AIE, UE) estiment toutes qu'il faudra mobiliser l'ensemble des technologies bas carbone (renouvelables, nucléaire et CCS) pour réduire les émissions, et les scénarios 100 % renouvelables font l'objet de nombreuses critiques.

### **L'énergie nucléaire a le potentiel aujourd'hui pour décarboner plus et plus rapidement**

Le nucléaire est industriellement disponible aujourd'hui dans tous les grands pays émetteurs de gaz à effet de serre de la planète ; Chine, États-Unis, Inde, Europe, Japon... Il représente une véritable alternative bas carbone au charbon, puisqu'il permet lui aussi de produire de l'électricité de manière massive, avec une disponibilité moyenne de l'ordre de 90 %. Comme le montre l'exemple de la France, la flexibilité du nucléaire rend possible le développement des renouvelables variables. Il s'insère dans le système électrique européen et évite en bonne part le recours à des unités à gaz ou à charbon dans les pays qui développent des parcs renouvelables. De manière générale, l'électricité bas carbone est un outil privilégié par les scénarios de décarbonation profonde.

L'électrification des usages est facilitée par une électricité bon marché : une étude récente du MIT démontre, à travers l'analyse de plus de 1 000 scénarios, que le coût de production de l'électricité décarbonée est d'autant moins cher que le mix est diversifié et inclut toutes les sources disponibles, dont le nucléaire. Enfin, à long terme, avec le développement de nouveaux types de réacteurs, le nucléaire sera en mesure de décarboner d'autres secteurs que l'électricité, comme par exemple la production de chaleur industrielle.



# Recommandations

La France est un des rares pays industrialisés au monde à bénéficier déjà d'une électricité décarbonée, et ceci grâce à l'énergie nucléaire. Elle est, du point de vue de sa politique climatique, dans une situation particulière.

## **Au niveau national, la France doit :**

**Piloter de manière prudente son mix électrique, pour ne jamais être accusée à devoir développer à court et moyen terme des centrales à gaz :**

- Le pays s'engage actuellement dans une stratégie de réduction de la part du nucléaire dans son mix électrique. Il doit faire face, dans les années à venir, à trois types d'incertitudes : la stratégie de ses voisins (avec lesquels il est de plus en plus interconnecté), l'évolution de la demande d'électricité (difficile à prévoir avec le développement des usages) et le rythme de déploiement des sources de production et des moyens de stockage (back-up) alternatifs. Il convient donc d'adopter une attitude prudente, et ne pas prendre *a priori* des décisions de fermetures de réacteurs dont nous pourrions avoir besoin, par exemple pour accompagner, grâce à leur capacité de suivi de charge, le développement des énergies renouvelables. Auquel cas, la seule solution serait la construction de centrales à gaz (voire l'importation de gaz), émettrices de gaz à effet de serre. Celles-ci pourraient engendrer, une fois construites, un effet de « lock-in », engageant la France sur de nombreuses années.
- À l'horizon 2050, les scénarios montrent que la France aura besoin, dans un mix électrique diversifié, d'un socle nucléaire. Elle doit donc commencer à préparer le renouvellement de son parc nucléaire actuel, avec la construction d'un certain nombre de nouveaux réacteurs entre 2030 et 2050. Là encore, si elle ne se prépare pas, le risque qu'elle doive ici aussi s'appuyer sur des centrales à gaz n'est pas négligeable.

**Tirer parti de son électricité bas carbone pour décarboner le quotidien des Français, principalement dans les transports (29 % des émissions de CO<sub>2</sub>) et dans l'habitat.**

L'électricité bas carbone est un très grand atout pour décarboner d'autres secteurs. Elle offre des solutions simples à utiliser pour de nombreux usages (mobilité, froid, chaleur, objets connectés..) dans le quotidien des Français. Elle présente dès aujourd'hui une excellente sécurité d'approvisionnement, et bénéficie d'un très vaste réseau de distribution déjà déployé sur tout le territoire. Enfin, avec le développement des capacités d'effacement et d'auto-

consommation, elle contribue à offrir la liberté aux consommateurs de gérer leurs usages et leur production selon leurs propres critères, ce qui constitue un facteur clef pour assurer le succès de la transition écologique.

La France porte une responsabilité particulière, en ce sens qu'elle dispose d'une position diplomatique forte sur les questions climatiques, et qu'elle est un grand pays nucléaire.

### **Au niveau international, la France doit :**

#### **Garantir la compétence industrielle nucléaire au niveau européen :**

L'Union européenne reste, malgré une réelle ambition en matière climatique, le troisième plus gros émetteurs de gaz à effet de serre de la planète. Ses émissions continuent à augmenter, et elle aura besoin du nucléaire pour atteindre ses objectifs climatiques en 2050. La France est le dernier pays en Europe apte à concevoir, construire, opérer et démanteler des réacteurs nucléaires, si toutefois elle entretient ses compétences par le lancement d'un programme national sans tarder. C'est seulement grâce à la France qu'il sera encore possible, si une prise de conscience le permet, de relancer dans les toutes prochaines décennies des programmes européens.

#### **S'engager pour que la technologie nucléaire soit reconnue pour les services qu'elle rend, et puisse jouer son rôle :**

L'énergie nucléaire a fait ses preuves en matière d'efficacité pour décarboner le système électrique, mais elle a le potentiel de faire plus, et plus vite. Parce qu'elle fait l'objet de débats passionnés et qu'elle suscite historiquement une hostilité forte dans les milieux environnementaux, sa place est aujourd'hui insuffisante dans les discussions climatiques, par exemple lors de la Convention-cadre des Nations unies sur le changement climatique (CCNUCC). Plusieurs initiatives gouvernementales ont récemment vu le jour pour s'intéresser au développement du nucléaire : celle de l'OCDE-AIE mais aussi l'initiative gouvernementale NICE<sup>1</sup>. Cette dernière, qui rassemble le Canada, le Japon et les États-Unis (malgré leur retrait de l'accord de Paris), mais dont la France et l'Union européenne sont étonnamment absentes, vise à accélérer l'innovation dans la technologie nucléaire, avec des objectifs de décarbonation.

1 – <http://www.cleanenergyministerial.org/initiative-clean-energy-ministerial/nuclear-innovation-clean-energy-future-nice-future>

# Introduction

La France s'est fixée une ambition nationale et internationale dans la lutte contre le changement climatique.

## Au niveau international

L'engagement français, qui a abouti à la signature de l'accord de Paris en décembre 2015, s'est poursuivi de manière soutenue avec :

- L'initiative « Make our planet great again » en juin 2017 : un appel aux scientifiques du climat à rejoindre la France, dans le cadre de la mise en place d'un programme prioritaire de recherche.
- L'annonce, lors de la COP23 en novembre 2017 à Bonn (Allemagne), que la France se portait volontaire pour financer le solde manquant du budget du GIEC, après le retrait des États-Unis.
- L'initiative du « One Climate Summit » en décembre 2017 à Paris, puis en septembre 2018 à New York : celle-ci vise, en coopération avec l'ONU, à accélérer la mise en œuvre de l'accord de Paris par des initiatives, entre autres, dans le domaine de la finance verte.

## Au niveau national

La loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte (LTECV)<sup>2</sup> de juillet 2015 a fixé pour objectif de diviser par quatre les émissions de gaz à effet de serre entre 1990 et 2050 (facteur 4).

Parallèlement, la Stratégie nationale bas carbone (SNBC) a fixé la trajectoire de baisse des émissions de gaz à effet de serre<sup>3</sup> par secteurs et par périodes successives de quatre à cinq ans.

Le nouveau Plan climat annoncé par le gouvernement français en juin 2017 vise désormais la neutralité des émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2050, soit l'objectif de ne pas émettre de CO<sub>2</sub> à cet horizon.

À ce titre, le gouvernement a placé l'enjeu climatique comme étant la priorité numéro un de la prochaine Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE).

## **Le monde est en train de perdre la bataille climatique : trois ans après la COP21, les émissions de CO<sub>2</sub> continuent à augmenter**

En décembre 2015, à l'occasion de l'accord de Paris, 195 pays se sont engagés à réduire les émissions de gaz à effet de serre pour limiter à 2 °C, voire 1,5 °C, la hausse de température du globe d'ici 2100. Dans son dernier rapport d'octobre

2 - <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/loi-transition-energetique-croissance-verte>

3 - <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/strategie-nationale-bas-carbone-snbc>

2018, le GIEC indique que si les émissions continuent à leur rythme actuel, le réchauffement provoqué par l'homme pourrait atteindre les 1,5 °C, plus tôt que prévu, entre 2030 et 2050.

Aujourd'hui encore, plus de 80 %<sup>4</sup> de l'énergie que nous consommons provient toujours de ressources carbonées fossiles (charbon, pétrole, gaz), une proportion restée stable depuis trois décennies. Ces dernières rejettent dans l'atmosphère du CO<sub>2</sub>, un des principaux gaz à effet de serre qui menacent l'équilibre climatique. Une fois émises, les molécules de CO<sub>2</sub> restent jusqu'à une centaine d'années dans l'atmosphère<sup>5</sup> et s'y accumulent.

Malgré les engagements des pays en 2015, les émissions de CO<sub>2</sub> relatives à l'énergie, qui s'étaient stabilisées depuis 2014, étaient, selon l'Agence internationale de l'énergie (AIE)<sup>6</sup>, de nouveau reparties à la hausse avec un record historique de 32,5 milliards de tonnes en 2017. Cette hausse de 1,4 % par rapport à 2016, équivalente à celles de 170 millions de voitures additionnelles, était le résultat d'une robuste croissance mondiale (3,7 %), des prix bas pour les énergies fossiles et d'un ralentissement des progrès en matière d'efficacité énergétique.

### **Les émissions de CO<sub>2</sub> augmentent en France aussi**

Depuis 2015, et pour la troisième année consécutive, les émissions de gaz à effet de serre françaises, au lieu de diminuer, selon la trajectoire définie cette année-là par la SNBC, ont continué de croître. Ainsi, le Commissariat général au développement durable estime que, à climat constant, les émissions de gaz à effet de serre du mix énergétique français ont augmenté ainsi de 4 % en 2017 par rapport à 2016, principalement dans les secteurs du transport et de l'habitat.

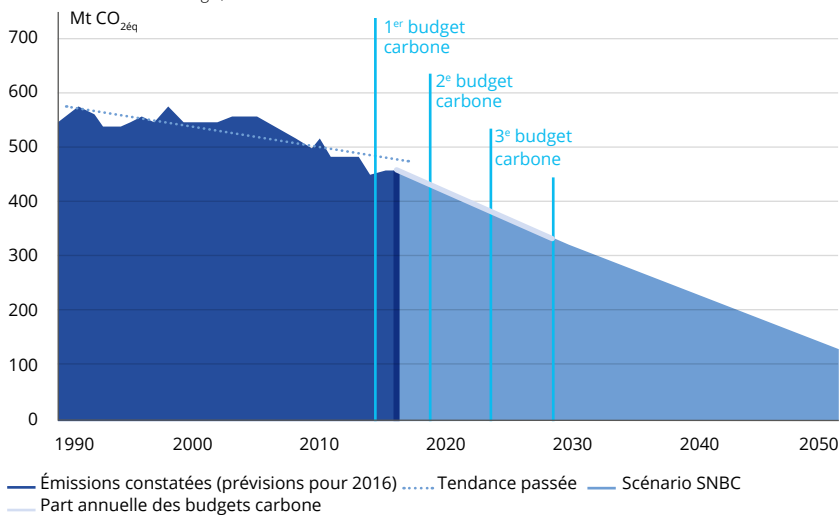
4 – Source : AIE.

5 – <https://jancovici.com/changement-climatique/gaz-a-effet-de-serre-et-cycle-du-carbone/quels-sont-les-gaz-a-effet-de-serre-quels-sont-leurs-contribution-a-leffet-de-serre/>

6 – [http://www.iea.org/geco/emissions/?utm\\_content=buffer0f533&utm\\_medium=social&utm\\_source=twitter.com&utm\\_campaign=buffer](http://www.iea.org/geco/emissions/?utm_content=buffer0f533&utm_medium=social&utm_source=twitter.com&utm_campaign=buffer)

Figure 1 : Évolution des émissions globales de gaz à effet de serre en France et objectifs SNBC.

Source : Ministère de l'Écologie, 2018.



Désormais, pour rejoindre la trajectoire fixée par la Stratégie nationale bas carbone, « *la tendance de réduction des émissions* » devra être encore plus soutenue : en moyenne de 3,5 % par an de 2015 à 2050. Plus la France tarde à rentrer dans une trajectoire de réduction des émissions, plus cette dernière nécessitera des efforts importants.

Le dérapage concerne en particulier les secteurs les plus émetteurs : transports, bâtiment, agriculture... *A contrario*, le secteur de la production d'énergie ne représente que 11 % des émissions de gaz à effet de serre du pays, en raison d'un mix de production électrique bas carbone, principalement alimenté par le nucléaire et l'hydraulique.

En conclusion, que ce soit au niveau mondial ou en France, on constate le manque d'efficacité des politiques mises en œuvre pour réduire et même stabiliser les émissions. Un tel résultat doit encourager les acteurs à considérer l'ensemble des solutions technologiques bas carbone qui sont à leur disposition pour atteindre leurs objectifs.

# 1. Le nucléaire, une source d'énergie bas carbone reconnue

Afin d'étudier le rôle du nucléaire dans les politiques climatiques, il convient d'abord de rappeler que le nucléaire est reconnu aujourd'hui par la communauté scientifique internationale comme une énergie très faiblement émettrice de gaz à effet de serre, et donc, à ce titre, comme une des solutions technologiques d'atténuation.

La réaction de fission nucléaire n'émet pas de gaz à effet de serre. La fission de 1 seul kilogramme d'uranium, enrichi à environ 4 % (procédé industriel permettant d'augmenter la concentration de matière fissile au sein du combustible), permet de produire autant d'énergie que la combustion de 143 tonnes de charbon. Il convient néanmoins d'évaluer les émissions qui sont générées par ailleurs, sur l'ensemble de la chaîne industrielle, et sur l'ensemble du cycle de vie de l'installation.

## **La même méthodologie est utilisée dans tous les secteurs pour calculer le bilan environnemental d'un service ou d'un produit**

L'analyse de cycle de vie (ACV) est aujourd'hui la méthode de référence et fait l'objet d'un consensus scientifique international. Elle est systématiquement utilisée, toutes industries confondues, pour faire le bilan environnemental d'un produit ou d'un service. Par la réalisation et l'étude détaillée d'un bilan matière complet, cette science de l'ingénieur permet d'analyser tout le cycle de vie d'un produit, du « berceau à la tombe », en prenant donc en compte l'amont (extraction des matières premières, fabrication, construction des infrastructures, etc.) et l'aval du produit (recyclage des matières, démantèlement des réacteurs, gestion des déchets, etc.).

L'ACV est d'abord un outil pour les industriels désireux d'objectiver la performance environnementale de leur produit et de la communiquer. Elle est aussi nécessaire aux pouvoirs publics qui ont besoin de références fiables pour comparer les empreintes environnementales de différents produits (exemple : un véhicule électrique), filières (traitement de déchets) et scénarios énergétiques (scénarios électronucléaires prospectifs). L'ACV est enfin très utile en écoconception, car elle permet une analyse environnementale quantifiée et communicable des produits.

L'ACV est normalisée depuis 2006 (normes ISO 14040 & 44). Une communauté de chercheurs, en croissance, travaille à son développement continu, notamment dans le cadre de la Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC). De nombreux secteurs publient des guides de bonnes pratiques spécifiques.

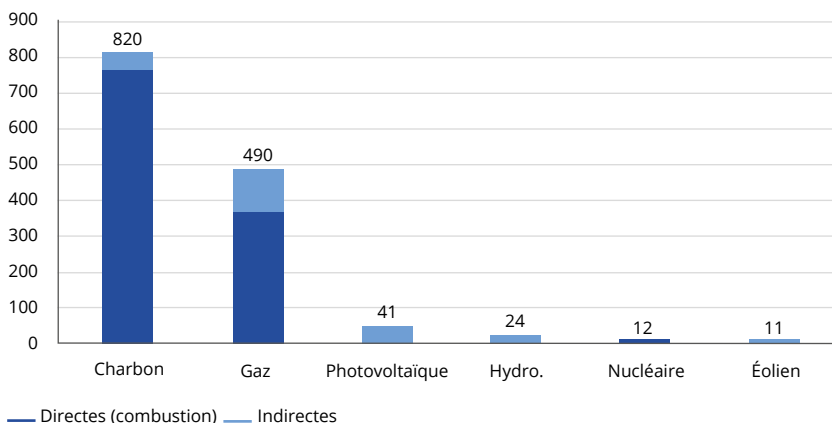
En ce qui concerne le nucléaire, de nombreuses ACV ont été réalisées, pour tous les pays. À titre d'exemple, l'électricien public suédois Vattenfall utilise largement l'ACV pour communiquer, via des déclarations environnementales produit (bilan de son parc nucléaire, centrales de Forsmark & Ringhals : 4 g eq CO<sub>2</sub>/kWh)<sup>7</sup>.

La variabilité des résultats s'explique par le choix des bases de données ACV d'arrière-plan utilisées, mais surtout pour ce qui concerne le nucléaire par les différences technologiques entre les différentes filières (types de mines, technologie et niveau d'enrichissement, cycle ouvert-fermé, etc.).

### **Le GIEC classe au niveau mondial le nucléaire parmi les énergies bas carbone, avec des émissions comparables à celles de l'éolien**

Figure 2 : Bilan gaz à effet de serre (g eq CO<sub>2</sub>/kWh).

Source : Revue de littérature IPCC par GIEC, 2015.



Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat des Nations unies (GIEC), qui utilise la méthodologie ACV, identifie trois sources d'énergie bas carbone : les énergies renouvelables, l'énergie nucléaire, et les énergies fossiles équipées de capture et séquestration de carbone.

En ce qui concerne la production d'électricité, le GIEC a réalisé une synthèse des études disponibles, qui constitue ainsi aujourd'hui une référence au niveau mondial.

Selon les experts du climat, le bilan médian gaz à effet de serre du kWh nucléaire est comparable à celui du kWh éolien, inférieur à celui du kWh photovoltaïque, et très largement inférieur à celui du kWh gaz et du kWh charbon.

7 - <https://gryphon4.environdec.com/system/data/files/6/12462/epd923%20Vattenfall%20Nuclear%20Power%202016.pdf>

## L'énergie nucléaire en France est encore plus bas carbone

Pour la France, plusieurs études ACV ont été publiées. Les émissions se situent dans la fourchette basse, en raison du faible contenu carbone de l'électricité utilisée pour l'étape d'enrichissement de l'uranium. Les résultats montrent une certaine variabilité, liée à la différence des bases de données utilisées :

- EDF a réalisé une étude ACV du kWh nucléaire (validée par revue critique), avec un résultat de 4 g eq CO<sub>2</sub>/kWh, qui est publié sur son site web (indicateur gaz à effet de serre mensuel EDF)<sup>8</sup>.
- Une étude<sup>9</sup> publiée par Elsevier en 2014 propose un bilan de 5 g eq CO<sub>2</sub>/kWh pour le cycle français actuel.

Ecoinvent, la base de données ACV de référence, propose un bilan GES de la filière électronucléaire française à 13 g eq CO<sub>2</sub>/kWh (version V3.3). Une étude de 2006<sup>10</sup> analyse les publications existantes et propose, compte tenu de leur variabilité, une fourchette de valeur de 3-24 g eq CO<sub>2</sub>/kWh.

8 – <https://intranet.edf.fr/documents/61865326/0/Profil+environnemental+du+KwH/c8437f2a-45ad-4813-8b82-0ece063dc224?version=1.0>

9 – Assessment of the environmental footprint of nuclear energy system. Comparison between closed and open fuel cycles (2014, C. Poinssot).

10 – A guide to life-cycle greenhouse gas (GHG) emissions from electric supply technologies (2006, D. Weisser).



## **D'autres études reportent aujourd'hui des chiffres d'émissions plus élevés : qu'en est-il ?**

Les études établissant les émissions de CO<sub>2</sub> plus élevées pour le nucléaire, souvent développées dans un cadre militant, n'utilisent pas la méthode ACV, qui fait pourtant l'objet d'un consensus scientifique international tous secteurs confondus (norme ISO).

### **L'étude de JKW Storm van Leeuwen et P. Smith : "Nuclear Power - The Energy Balance infrastructures"<sup>11</sup>**

Les auteurs n'utilisent pas le format scientifique ISO et proposent une nouvelle méthode, combinant des données d'énergie et de coûts. L'étude est publiée sur Internet, sans revue critique. Elle n'est pas reproductible, car les facteurs de conversion coûts-énergie ne sont pas systématiquement publiés ; très opaque, elle laisse voir, entre autres, des agrégations d'énergie thermique et d'énergie électrique (aux performances environnementales différentes), et des surestimations de consommations.

### **L'étude de M. Lenzen<sup>12</sup>**

Publiée en 2008, cette étude délaisse également les standards ISO. M. Lenzen évalue d'abord la quantité d'énergie au kilowattheure nucléaire produit, puis transforme cette énergie en CO<sub>2</sub> via une « intensité CO<sub>2</sub> » générique très défavorable (310 g CO<sub>2</sub>/kWh, correspondant à une économie 100 % charbon). Il arrive à la fourchette 10-130 g CO<sub>2</sub>/kWh. Ce scientifique s'inscrit dans le mouvement d'hybridation des bilans, qui cherche à exploiter des données économiques pour réaliser d'une nouvelle manière des bilans environnementaux. Apparues en 2006, ces méthodes ne sont pas parvenues depuis à se développer, principalement en raison de leur manque de transparence.

### **L'étude de B. Sovacool**

Enfin, en 2008, B. Sovacool<sup>13</sup> propose une méta-analyse d'études<sup>14</sup>, qui surpasse les deux études précédentes, et arrive à une valeur moyenne de 66 g CO<sub>2</sub>/kWh, bien au-delà des valeurs hautes des fourchettes ACV couramment admises. L'étude de B. Sovacool a d'ailleurs fait l'objet de plusieurs critiques du milieu scientifique.

Au total, des travaux scientifiques solides, documentés et non réfutés à ce jour prouvent l'excellent bilan environnemental du nucléaire français (moins de 10 g CO<sub>2</sub>/kWh), qui produit de l'électricité avec un des meilleurs bilans au monde. Ce bilan reste actuellement meilleur que celui du solaire ou de l'éolien, même si ces énergies progressent régulièrement.

11 - [http://greatchange.org/ov-storm,nuclear\\_energy\\_production\\_and\\_fuel\\_costs\\_rev6.pdf](http://greatchange.org/ov-storm,nuclear_energy_production_and_fuel_costs_rev6.pdf)

12 - Life cycle energy and greenhouse gas emissions of nuclear energy: a review (2008, M. Lenzen).

13 - Valuing the greenhouse gas emissions from nuclear power: a survey (2008, B. Sovacool).

14 - Les méta-analyses sont un des volets de la recherche ACV, visant à éclairer les intervalles de variation des résultats (provenant de la variabilité des filières et des études, données, etc.). Bien réalisées, elles permettent de remplacer le chiffre unique par des visions paramétrées pertinentes, ou par des abaques.

## 2. L'efficacité de l'énergie nucléaire à réduire les émissions de gaz à effet de serre est démontrée

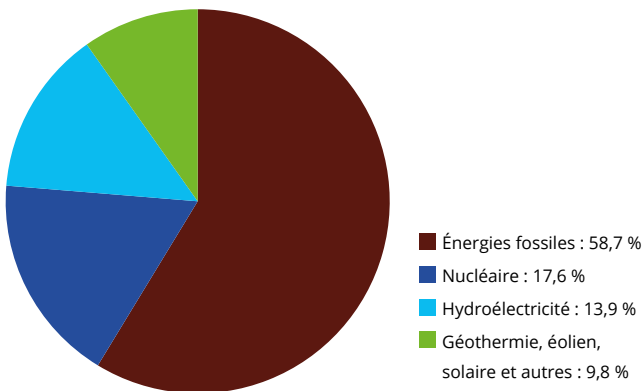
### L'énergie nucléaire est industriellement disponible et déployable à grande échelle

Parmi les sources d'énergie bas carbone identifiées par le GIEC, le nucléaire est une des rares solutions de production d'électricité à être aujourd'hui disponible industriellement et déployable à grande échelle.

Selon l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA)<sup>15</sup>, le parc nucléaire mondial est constitué de 455 réacteurs en opération, dans 30 pays différents, pour une capacité cumulée de près de 400 GW. Grâce à un taux de disponibilité moyen supérieur à 80 %, ce parc a produit en 2017 environ 2 500 TWh d'électricité, en légère hausse de 1,1 % par rapport à 2016. Ceci représente environ 10,3 % de la production mondiale d'électricité. Dans l'OCDE<sup>16</sup>, où sa part est plus importante, l'énergie nucléaire est la première source d'électricité bas carbone, et représente à elle seule 40 % de la totalité de l'électricité bas carbone produite.

Figure 3 : Parts de la production d'électricité par source au sein des pays de l'OCDE en 2017.

Source : IEA Monthly Electricity Data.



15 – AIEA, Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050, 2018 Edition.

16 – IEA, Key Electricity Trends, 2017.

Fin 2017, 59 nouvelles unités, correspondant à une capacité additionnelle de 60 GW, étaient en construction. L'année 2017 a vu la mise en ligne de quatre nouveaux réacteurs, lesquels ont compensé en capacité l'arrêt de cinq unités, et le démarrage de quatre nouveaux chantiers de construction. Les premiers mois de 2018 ont connu une accélération avec sept nouvelles connexions au réseau en Chine et en Russie : Sanmen 1 et 2, Haiyang, Taishan, Rostov 4, Leningrad II-1, et Yangjiang 5.

### **Depuis 1970 dans le monde, l'énergie nucléaire a permis d'éviter l'équivalent de cinq années d'émissions de CO<sub>2</sub> dans le secteur électrique**

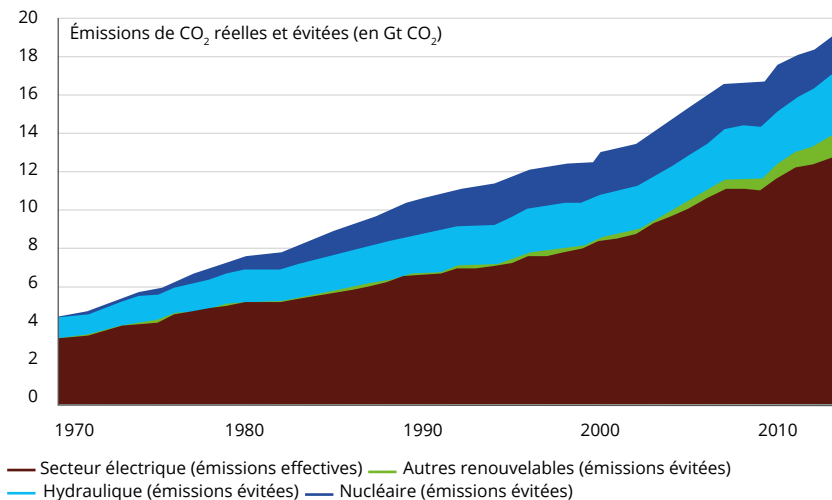
Au début des années 1960, l'hydroélectricité était la seule source importante de production d'électricité bas carbone. Le nucléaire a commencé alors à se développer dans beaucoup de pays comme un moyen moderne pour produire une électricité abondante et bon marché, permettant d'éviter des importations de pétrole et de gaz. Même si sa part dans le mix électrique est restée modérée, elle a fortement contribué, aux côtés de l'hydroélectricité, à éviter une très grande quantité d'émissions de gaz à effet de serre, et ceci avant même que ces dernières soient reconnues comme un problème environnemental.

Une étude de l'AIEA<sup>17</sup> a cherché à calculer le nombre de tonnes de CO<sub>2</sub> dont la production a été évitée depuis les années 1970 grâce aux différentes technologies bas carbone. Elle fait l'hypothèse que l'électricité, si elle n'avait pas été produite par l'hydraulique, le nucléaire et les autres énergies renouvelables, aurait été produite à partir de centrales à charbon, à pétrole, ou à gaz, dans les proportions qui étaient les leurs pour chaque année étudiée.

17 – IAEA, Climate Change and Nuclear Power, 2018.

Figure 4 : Émissions mondiales de CO<sub>2</sub> du secteur électrique et émissions évitées par l'utilisation de trois technologies bas carbone (renouvelables, hydroélectricité et nucléaire).

Source : IAEA calculations based on CO<sub>2</sub> emissions, power generation and fuel input data in Ref. [30] and emission factors data in Ref. [31].



Comme indiqué sur la figure, au cours de la période 1970-2013, l'utilisation de sources d'électricité bas carbone a permis d'éviter au total plus de 163 Gt d'émission de CO<sub>2</sub>.

L'énergie hydraulique était la première contributrice, avec un peu plus de la moitié des émissions évitées (87 Gt de CO<sub>2</sub>). Le nucléaire vient en second avec 40 % (66 Gt de CO<sub>2</sub>) environ des émissions évitées, soit l'équivalent de cinq années d'émissions du secteur électrique. La contribution des autres sources d'énergies renouvelables (10 Gt de CO<sub>2</sub>) reste marginale jusqu'à la fin des années 2000.

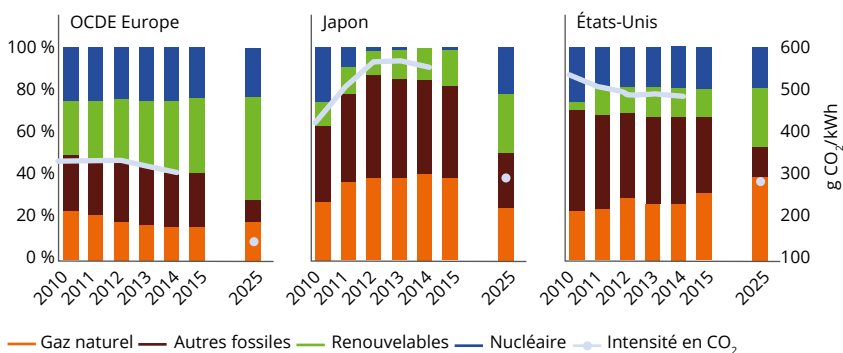
Autrement dit, si les centrales nucléaires ne fournissent que 10 % environ de l'électricité mondiale, elles sont un levier efficace pour réduire les émissions de gaz à effet de serre : chaque année, les centrales nucléaires évitent que 2 gigatonnes de gaz carbonique ne se libèrent dans l'atmosphère, équivalant à 400 millions de voitures.

**L'énergie nucléaire, aux côtés des renouvelables, permet à l'Europe d'être en avance en matière de lutte contre les émissions de gaz à effet de serre**  
Précurseur dans la lutte contre le changement climatique, l'Europe s'est imposée des objectifs contraignants de réduction des émissions de gaz à effet de serre et a effectivement mis en œuvre des politiques pour les atteindre.

L'énergie nucléaire représente aujourd'hui près de la moitié<sup>18</sup> de l'électricité bas carbone européenne. C'est grâce à son électricité nucléaire, combinée à ses investissements dans les énergies renouvelables, que l'Union européenne est aujourd'hui en avance, s'agissant d'intensité carbone, sur les autres grandes régions industrielles développées<sup>19</sup>.

Figure 5 : Mix de production électrique et intensité en CO<sub>2</sub>.

Source : AIE, ETP 2017.



**À l'exception de la Norvège, les pays européens qui ont réduit rapidement leurs émissions dans le secteur électrique combinent énergie nucléaire et hydroélectricité**

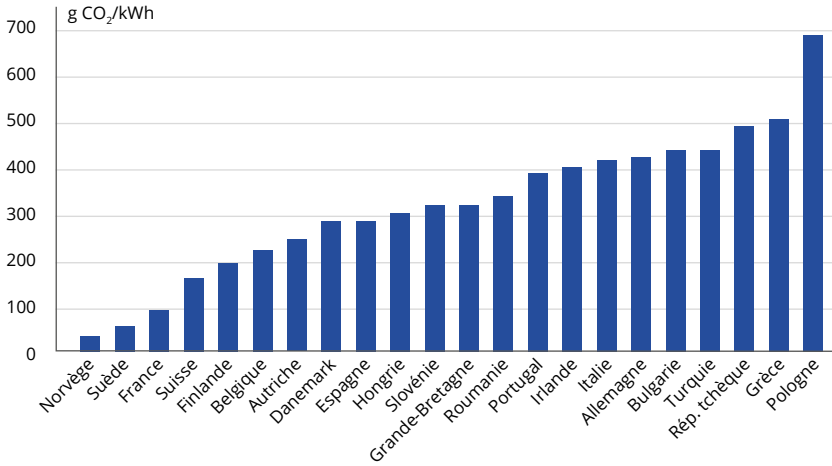
Alors que l'intensité carbone moyenne du secteur électrique est toujours supérieure à 400 g CO<sub>2</sub>/KWh dans les pays de l'OCDE, quatre pays européens seulement ont réussi à décarboner leur électricité sous les 100 g de CO<sub>2</sub>/kWh : la Norvège, qui possède une capacité hydroélectrique exceptionnelle, et trois pays qui combinent aujourd'hui nucléaire et renouvelables : la Suède (40 % nucléaire, 50 % hydraulique), la Suisse (40 % nucléaire, 60 % hydraulique) et la France (73 % nucléaire, 17 % hydraulique). Un haut pourcentage d'énergies solaires et éoliennes dans le mix électrique ne garantit pas aujourd'hui un haut niveau de décarbonation, comme le montrent les résultats du Danemark, du Portugal, ou de l'Allemagne.

18 – Eurelectric Facts & Figures, December 2016.

19 – IEA, ETP, July 2017.

Figure 6 : Intensité carbone du secteur électrique (10/16-09/17).

Source : Massachusetts Institute of Technology, 2018.



### Grâce à l'énergie nucléaire, la France est le pays le plus décarboné des sept plus grands pays industrialisés (G7)

La France est le grand pays industrialisé le moins émetteur de CO<sub>2</sub> avec 4,6 tonnes de CO<sub>2</sub>/hab.

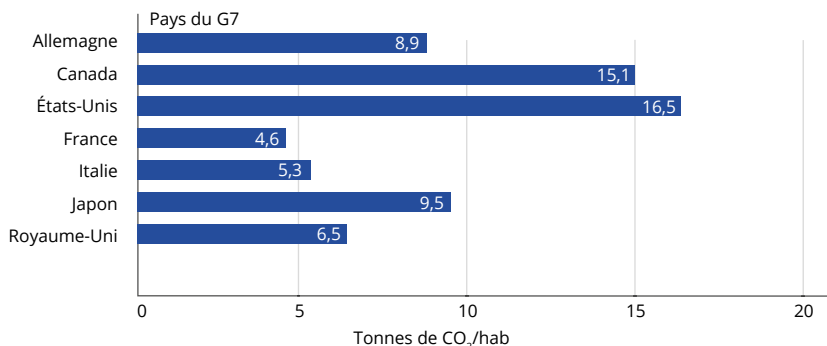
En France, le système électrique était en 2017 à 90 % bas carbone grâce à une combinaison alliant énergie nucléaire (73 %) et renouvelables (17 %, avec une part importante d'hydroélectricité).

La France est dans une situation exceptionnelle puisque nous avons déjà atteint les objectifs que l'Agence internationale de l'énergie avait fixés pour 2050. Cette performance fait de la France le pays le moins émetteur des grands pays industrialisés. Un Français émet en moyenne par an un peu moins de cinq tonnes de CO<sub>2</sub>, alors qu'un Allemand en émet 70 % de moins et un Américain près de trois fois plus.

Cette électricité décarbonée est aujourd'hui un atout pour la France afin de décarboner les autres secteurs de son économie qui sont fortement émetteurs de gaz à effet de serre ; en premier lieu le transport, grand consommateur d'énergie fossile et émetteur de près de 29 % de nos émissions totales de CO<sub>2</sub>. En passant du moteur à essence au moteur électrique, la France dispose d'un atout énorme pour justement continuer à lutter contre le réchauffement climatique et diminuer ses émissions de gaz à effet de serre.

Figure 7 : Émissions en tonnes de CO<sub>2</sub>/hab.

Source : Banque mondiale.



La France a exporté ces dernières années entre 38 TWh (2017) et 65,1 TWh (2014) d'électricité à ses voisins, soit environ 10 % de sa production, avec des pointes allant jusqu'à 74,2 TWh en 2017. Ces exportations contribuent à l'équilibre du système électrique de nos voisins et aussi à l'équilibre de notre balance commerciale, à savoir près de 2 milliards d'euros par an en moyenne. Mais surtout, parce que sa teneur en carbone est très faible (76 g CO<sub>2</sub>/MWh) par rapport à la moyenne européenne (350 g CO<sub>2</sub>/MWh), la France contribue à décarboner le mix électrique de ses voisins européens.

De ce point de vue, la France a une contribution similaire à celle de la Suède qui est allée en 2015, année record de production de son parc composé d'hydraulique, de nucléaire et d'éolien, jusqu'à exporter près de la moitié<sup>20</sup> de sa production électrique bas carbone à ses voisins, contribuant ainsi à l'équilibre et à la décarbonation du mix électrique du Danemark et de la Finlande, mais aussi de pays très consommateurs de charbon comme la Pologne, l'Allemagne et la Lituanie.

### **En Suède, le nucléaire a démontré sa capacité à décarboner rapidement le système électrique**

Entre 1970 et 1990, le parc nucléaire mondial s'est déployé très rapidement. En 1970, il était constitué de seulement 82 réacteurs, pour une capacité installée totale de 16 GW. Cinq ans après, on dénombrait 168 réacteurs (capacité de 72 GW) en 1975, puis 420 réacteurs (capacité de 327 GW) en 1990. En vingt ans, le nombre de réacteurs en service a été multiplié par cinq et la puissance nette installée par vingt. Cette expansion a été d'autant plus spectaculaire que, dans les années 1970 et 1980, la technologie était encore assez nouvelle, et la plupart des acteurs ont dû, en même temps, développer leurs compétences et leur maîtrise industrielle. L'analyse<sup>21</sup> du programme nucléaire suédois, déployé entre 1970 et 1990, illustre particulièrement le potentiel de décarbonation rapide présenté par le nucléaire.

20 – <https://news.vattenfall.com/en/article/large-electricity-production-and-record-exports-sweden>

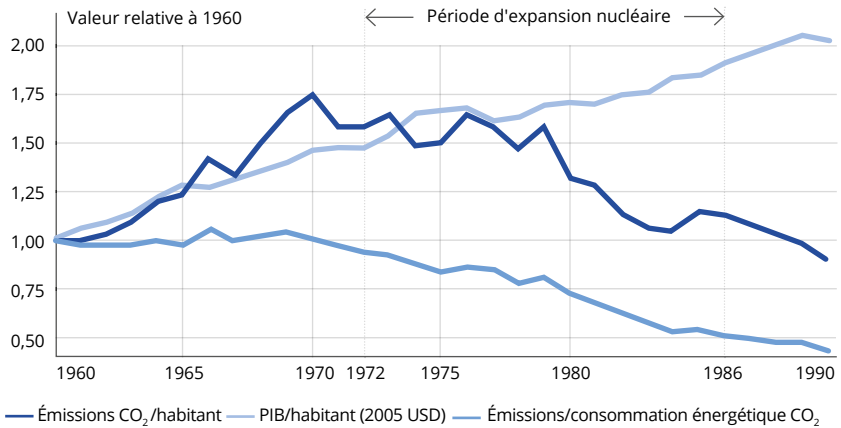
21 – Qvist et Brook, 2015.

Comme le montre la figure 8, avant le lancement du programme nucléaire, la croissance des émissions de CO<sub>2</sub> suivait, voire excédait, la croissance du PNB. Avec le déploiement du programme nucléaire, entre 1972 et 1986, les émissions par habitant ont baissé en moins de 20 ans de 75 %.

La Suède s'est par ailleurs appuyée sur son système électrique pour décarboner les usages : alimentation de l'industrie, réduction de l'utilisation de fossiles dans le tertiaire et le résidentiel, etc. Plus largement, le pays exporte son électricité bas carbone chez ses voisins, contribuant ainsi à réduire leur empreinte carbone.

**Figure 8 : Émissions totales de CO<sub>2</sub> et PIB par habitant de la Suède de 1960 à 1990, normalisée sur le niveau de 1960.**

Source : Potential for Worldwide Displacement of Fossil-Fuel Electricity by Nuclear Energy in Three Decades Based on Extrapolation of Regional Deployment Data, Plos One, 2015.



Une étude de 2016<sup>22</sup> analyse et compare les programmes de déploiement de capacités de production bas carbone dans différents pays depuis les années 1970. Pour comparer leur efficacité en matière de contribution, elle regarde la production effective d'électricité bas carbone additionnelle par habitant, en rythme annuel.

Depuis les années 2000, plusieurs pays (Allemagne, Danemark ou États-Unis) ont mis en œuvre des politiques de soutien ambitieuses pour le déploiement rapide de capacités solaires et éoliennes.

Quand on regarde l'historique néanmoins, le rythme atteint par la Suède avec l'énergie nucléaire entre 1976 et 1986 reste cinq fois supérieur au programme

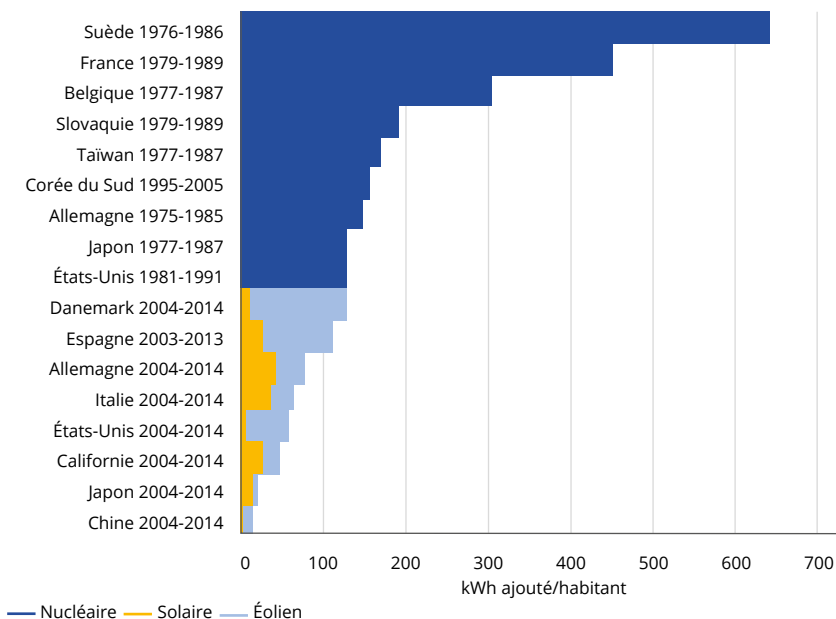
22 – [http://science.sciencemag.org/content/sci/suppl/2016/08/03/353.6299.547.DC1/aaf7131Cao\\_SM.pdf](http://science.sciencemag.org/content/sci/suppl/2016/08/03/353.6299.547.DC1/aaf7131Cao_SM.pdf)



du Danemark, pays qui a mis œuvre le programme le plus important de décarbonation du système électrique avec un investissement massif dans l'éolien. La performance de la Suède n'a jamais été égalée à ce jour. On constate des résultats similaires dans tous les pays ayant engagé des programmes de déploiement du nucléaire (France, Belgique, Slovaquie, Taïwan).

**Figure 9 : Augmentation moyenne annuelle de production d'électricité décarbonée en kWh/habitant pendant la décennie du pic d'installation de nouvelles capacités.**

Source : The power to decarbonize, Environmental progress, 2017.



NOTE SFEN - OCTOBRE 2018

## L'exploitation du nucléaire dans un contexte de changement climatique

Le changement climatique implique une augmentation de la récurrence et de la force des événements climatiques extrêmes (sécheresses, ouragans, cyclones polaires, etc.). Les centrales nucléaires, dimensionnées pour faire face aux agressions externes, le sont aussi pour faire face aux agressions naturelles.

Lors des phénomènes de très grands froids, comme ceux qu'ont connus les États-Unis en 2014 ou en 2018, les centrales nucléaires se sont avérées des atouts précieux. En 2014, à des températures inférieures à -20 °C, dans un contexte de forte demande énergétique en raison des besoins en chauffage, 95 % des réacteurs fonctionnaient à pleine puissance, alors que l'approvisionnement des centrales à gaz était restreint par les besoins de cette ressource pour le chauffage urbain. Dans ce moment climatique critique, le nucléaire fournissait plus d'électricité dans le nord des États-Unis que toutes les autres sources de production électrique.

Les risques météorologiques sévères (ouragans, tornades, inondations) ont été pris en compte dans la conception des centrales nucléaires dans le monde. Pendant les ouragans, les centrales nucléaires peuvent fonctionner jusqu'à des vents de 120 km/h. Si leur vitesse est supérieure, la centrale est préventivement arrêtée et peut redémarrer dès que la vitesse du vent redescend. En 1992, la centrale de Turkey Point, en Floride, avait été au cœur de l'ouragan Andrew de catégorie 5, sans subir de dommage. De la même manière, en 2011, 24 réacteurs nucléaires localisés entre la Caroline du Nord et la Nouvelle-Angleterre avaient résisté sans problème à l'ouragan Irene de catégorie 3.

Enfin, en cas de sécheresse, la production d'électricité nucléaire est peu affectée. Entre 2000 et 2017, les pertes de production liées aux contraintes climatiques n'ont représenté en France que 0,18 % en moyenne de la production d'électricité d'origine nucléaire. Celles-ci concernent surtout des réacteurs installés le long de cours d'eau et presque jamais ceux installés en bord de mer. Rare exception, à l'été 2018 l'opérateur suédois Vattenfall avait dû réduire la puissance du réacteur n° 2 de la centrale de Ringhals en raison des fortes chaleurs qui avaient porté la température de la mer à 25 °C, température à laquelle certains composants de ce réacteur n'étaient pas dimensionnés. Pour autant, Vattenfall précise qu'il lui suffirait de chercher l'eau de mer à une profondeur légèrement inférieure ou de changer quelques composants de sa centrale pour que cette situation ne puisse plus poser problème. Pour rappel en effet, de très nombreuses centrales nucléaires fonctionnent dans des régions tropicales aux eaux beaucoup plus chaudes.

### 3. A contrario, les mises à l'arrêt de centrales nucléaires ont abouti à une stagnation, voire à une augmentation, des émissions de gaz à effet de serre

Ces dernières années, dans des pays comme les États-Unis, le Japon, ou l'Allemagne, les fermetures prématurées de centrales nucléaires ont entraîné une stagnation, voire une augmentation des émissions de CO<sub>2</sub>. Dans le premier cas, les politiques se sont révélées inefficaces car les investissements pour le développement des énergies renouvelables sont venus se substituer à une baisse de la capacité nucléaire : ils n'ont donc pas permis de réduire d'autant la production à base d'énergies fossiles.

Ces résultats sont d'autant plus significatifs qu'ils viennent de pays riches, disposant d'un accès privilégié aux dernières technologies, engagés à la fois dans le développement ambitieux des énergies éoliennes et solaires, et dans les programmes d'efficacité énergétique. La grande majorité des États, particulièrement les pays du Sud, n'ont pas la possibilité d'utiliser de tels efforts. Les politiques basées exclusivement sur l'efficacité énergétique et le développement des énergies solaires et éoliennes, se sont heurtées à la nécessité d'équilibrer le système électrique à tout moment, pour assurer l'équilibre entre la demande et l'offre d'électricité sur le réseau. Le nucléaire est une énergie pilotable, avec un facteur de disponibilité supérieur à 90 %, permettant de répondre quasiment à chaque instant (dès lors que l'on dispose de plusieurs réacteurs) à des besoins d'équilibrage offre-demande. Alors que les ressources hydroélectriques sont souvent limitées, et en l'absence de moyens de stockage de l'électricité à grande échelle, les seuls moyens de production pilotables qui peuvent se substituer au nucléaire sont les centrales à gaz ou à charbon.

#### **Aux États-Unis, le gaz de schiste se substitue à l'énergie nucléaire**

En dépit du retrait des États-Unis de l'accord de Paris, de nombreux États américains ont continué leur engagement dans des politiques de lutte contre le changement climatique. Ces dernières ne prennent souvent pas en compte le rôle joué par l'énergie nucléaire pour atteindre les objectifs de décarbonation du système électrique.

Pourtant, l'énergie nucléaire représente plus de 56 % de la production d'électricité bas carbone américaine, trois fois plus que l'hydroélectricité et l'éolien, et près de vingt fois plus que l'énergie solaire.

Le développement du gaz de schiste a permis de diviser le prix du gaz par trois

en dix ans aux États-Unis. En l'absence d'un prix du CO<sub>2</sub>, les centrales nucléaires subissent la concurrence très forte des centrales à gaz, fortement émettrices de gaz à effet de serre.

Certains États porteurs d'objectifs climatiques ambitieux, comme le Vermont et la Californie, ont laissé fermer leurs centrales, tablant que leur production serait compensée par des énergies renouvelables. À l'inverse, d'autres États, comme le New Jersey, ont décidé de mettre en place des mécanismes de compensation pour soutenir le nucléaire face à la concurrence du gaz de schiste.

### Vermont

Une étude<sup>23</sup> a montré que l'arrêt fin 2014 de la centrale de Vermont Yankee, n'a pas – contrairement à ce qui avait été envisagé – été compensé par une combinaison d'économies d'énergies et d'investissements dans les énergies renouvelables. La consommation d'électricité est finalement restée stable, la consommation de gaz a augmenté de cinq points en Nouvelle-Angleterre et les émissions de CO<sub>2</sub> ont augmenté de 2 millions de tonnes en 2015, l'année suivant l'arrêt de la centrale.

### Californie

Un phénomène similaire a été observé en Californie après la fermeture de la centrale nucléaire de San Onofre<sup>24</sup> en 2012. Le nucléaire a été remplacé principalement par une augmentation de la production de gaz de schiste<sup>25</sup>. Une augmentation des émissions de 9 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> a été observée sur les douze mois suivant l'arrêt de la centrale, équivalant aux émissions de 2 millions de voitures.

Malgré un programme volontaire de développement des énergies renouvelables, démarré dès 2002, le solaire et l'éolien ne représentaient toujours pas plus de 20 % du mix électrique en 2017. La Californie compte 29 centrales à gaz, lesquelles représentent 43 %<sup>26</sup> de sa production d'électricité.

Deux réacteurs nucléaires génèrent près de 9 % de l'électricité. Leur exploitant, l'électricien PG&E, a néanmoins annoncé en juin 2016 son intention de fermer les unités en 2024 et 2025, en l'absence d'un mécanisme qui lui permettrait une exploitation rentable face à la concurrence des centrales à gaz. Plusieurs experts se sont depuis alarmés que l'arrêt de la centrale pouvait de nouveau entraîner une hausse des émissions, et rendre les objectifs de décarbonation de l'État difficiles voire impossibles à atteindre<sup>27</sup>. L'État de Californie a annoncé en août 2018 un objectif de décarbonation totale de son électricité d'ici 2045.

23 – Source : <http://instituteforenergyresearch.org/analysis/new-england-using-more-natural-gas-following-vermont-yankee-closure/>

24 – <https://ei.haas.berkeley.edu/research/papers/WP248.pdf>

25 – Le réseau californien est déjà très saturé en renouvelables pour assurer l'équilibre du système s'agissant d'offre et de demande.

26 – [http://www.energy.ca.gov/almanac/electricity\\_data/total\\_system\\_power.html](http://www.energy.ca.gov/almanac/electricity_data/total_system_power.html)

27 – <http://environmentalprogress.org/big-news/2016/7/3/closing-diablo-canyon-would-increase-carbon-emissions-experts-agree>

## New Jersey

En 2017, l'énergie nucléaire représentait pas moins de 97 % de l'électricité bas carbone produite dans cet État.

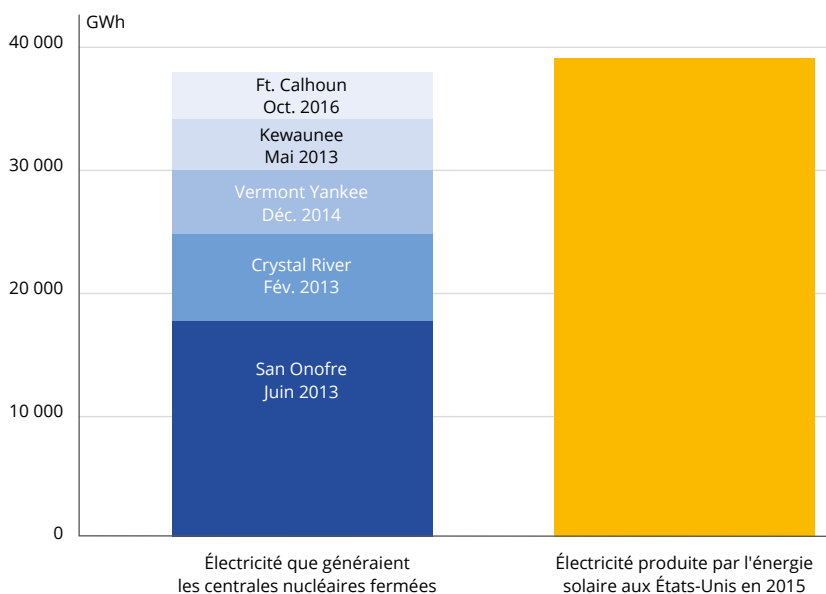
La fermeture de la centrale de Oyster Creek, propriété de l'exploitant Exelon, en septembre 2018, s'accompagne là encore d'une prévision à la hausse des émissions<sup>28</sup>. Une nouvelle centrale à gaz vient en effet d'être mise en ligne dans le New Jersey, et une deuxième démarrera avant la fermeture définitive d'une nouvelle centrale nucléaire, celle de Pilgrim, prévue en juin 2019.

## À l'échelle du pays

Sur le plan des émissions de CO<sub>2</sub>, selon l'ONG Environmental Progress<sup>29</sup>, les arrêts de centrales nucléaires déjà advenus ou à venir ont cannibalisé le développement de l'énergie solaire aux États-Unis, comme l'indique le graphe ci-dessous. La production bas carbone perdue par l'arrêt des centrales nucléaires correspond en effet à l'ensemble de la production solaire du pays. Ainsi les investissements n'auraient pas permis de réduction nette des émissions de CO<sub>2</sub>.

Figure 10 : Cinq centrales nucléaires fermées généraient pratiquement la même quantité d'électricité que toutes les installations solaires des États-Unis en 2015.

Source : Energy Information Administration (EIA) et Environmental progress, 2017. Assumes 90% capacity factor.



28 - [http://www.naturalgasintel.com/articles/115803-oyster-creek-nuke-retires-gas-demand-set-to-grow-as-wave-of-retirements-planned-by-2023?utm\\_source=dlvr.it&utm\\_medium=twitter#.W6LLrDxhmn4.twitter](http://www.naturalgasintel.com/articles/115803-oyster-creek-nuke-retires-gas-demand-set-to-grow-as-wave-of-retirements-planned-by-2023?utm_source=dlvr.it&utm_medium=twitter#.W6LLrDxhmn4.twitter)

29 - <http://www.environmentalprogress.org/united-states/>

## **En dépit d'investissements massifs, l'Allemagne échoue à atteindre ses objectifs climatiques**

L'Allemagne est de loin le plus grand émetteur d'émissions de gaz à effet de serre d'Europe, avec 23 %<sup>30</sup> des émissions totales en 2017.

En 2011, à la suite de l'accident de Fukushima, les autorités allemandes ont immédiatement ordonné l'arrêt de sept tranches nucléaires, pourtant jugées sûres par leur autorité de sûreté. Ils ont alors annoncé leur politique de transition énergétique (*Energiewende*). Celle-ci prévoyait une sortie du nucléaire en 2022, en la décarbonation presque totale de l'économie en 2050 grâce au développement généralisé des énergies renouvelables et à la baisse de la consommation.

En 2017, si le pays a atteint 33 % d'énergies renouvelables dans la production électrique, la part représentée par le charbon et le lignite est restée stable depuis 2011, aux alentours de 40 %. Ainsi, malgré les 25 milliards d'euros investis par an<sup>31</sup>, les émissions de CO<sub>2</sub> au kWh en 2017 étaient encore de 489 g de CO<sub>2</sub><sup>32</sup> par kWh. L'Allemagne demeure le pays le plus émetteur d'Europe.

En conséquence, l'Allemagne a annoncé en 2018 qu'elle n'atteindrait pas la cible nationale de 40 % de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> d'ici 2020 par rapport à 1990 – tout au plus parviendra-t-elle à une baisse de 30 à 35 %. Son gouvernement a aussi demandé, pendant l'été 2018, à la Commission européenne de renoncer à l'idée de fixer des objectifs plus ambitieux à l'horizon 2030 pour réduire les émissions de gaz à effet de serre dans l'Union.

## **Au Japon, la mise à l'arrêt provisoire des réacteurs nucléaires a eu pour conséquence une augmentation des importations d'énergies fossiles et des émissions de CO<sub>2</sub>**

En 2010, avant l'accident de Fukushima, le Japon produisait 34 % de son électricité à partir de sources bas carbone, dont 27 % à partir d'énergie nucléaire. L'arrêt du parc nucléaire après l'accident de Fukushima a entraîné une hausse de la consommation d'énergies fossiles et, *de facto*, une hausse des émissions de CO<sub>2</sub> de l'archipel. Le pays a dû se désengager des objectifs fixés par le protocole de Kyoto (1997).

En 2015, trois ans après l'arrêt provisoire des réacteurs nucléaires consécutif à l'accident, la part des énergies bas carbone dans l'électricité était descendue sous les 10 %, les importations de charbon et de gaz avaient bondi, et les émissions de CO<sub>2</sub> par habitant étaient passées de 9,1 tonnes par habitant en 2010 à 9,9 tonnes.

Alors que le Japon est aujourd'hui premier acheteur mondial de gaz naturel liquéfié (LNG), on estime qu'avec chaque réacteur qui redémarre le pays

30 – Source : Eurostats.

31 – Source : France Stratégie.

32 – Agence fédérale de l'environnement (UBA).

économise l'importation de 1 million de tonnes de LNG par an<sup>33</sup>, et évite les émissions associées.

**En France : plus de 80 % des investissements dans les énergies renouvelables sont alloués au secteur électrique, déjà décarboné**

Dans l'Hexagone, le secteur électrique, déjà décarboné à plus de 90 %, représente moins de 6 %<sup>34</sup> des émissions de gaz à effet de serre. Les secteurs du transport (28,5 %), du résidentiel-tertiaire (15,8 %) sont de très loin les deux plus gros émetteurs.

Dans la loi LTCEV, la France a fixé des objectifs ambitieux de développement des énergies renouvelables. Dans son rapport d'avril 2018, la Cour des comptes rappelle que la somme des dépenses publiques de soutien aux renouvelables est estimée pour l'année 2016 à 5,3 Md€, en croissance pour atteindre 7,5 Md€ par an en 2023. Elle remarque que les renouvelables électriques bénéficient de l'essentiel de ces dépenses publiques avec, en 2016, 4,4 Md€, soient 83 % du total, alors que le secteur électrique est très faiblement émetteur. *A contrario*, l'État n'alloue que 567 M€ pour le développement des renouvelables thermiques, alors que le secteur du chauffage est très fortement consommateur de gaz et de fuel, et présente donc un grand potentiel de réduction des émissions. La Cour des comptes note ainsi que la part que représente les renouvelables thermiques n'est pas « à la hauteur des besoins correspondant aux objectifs fixés et donc à la réalisation des engagements climatiques français » (sic : Cour des comptes).

Si diversifier le mix électrique n'a pas d'impact attendu en matière de réduction de gaz à effet de serre, il peut même conduire à l'effet contraire si le changement est brutal : dans son scénario prévisionnel 2017, RTE montre que, pour atteindre un objectif de 50 % de nucléaire, il serait nécessaire de construire environ une vingtaine de centrales à gaz supplémentaires aux installations actuelles. Cette stratégie conduirait à une augmentation des émissions de CO<sub>2</sub> du système électrique français vers des niveaux compris entre 38 et 55 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> par an.

33 – <https://www.reuters.com/article/us-japan-nuclear-lng-demand/japans-nuclear-reboot-gathers-pace-set-to-curtail-lng-demand-idUSKCN1LG17E>

34 – Source : RTE, MTEs.

## Le nucléaire est aussi une solution pour les nouveaux grands enjeux environnementaux (pollution, biodiversité, ressources)

La lutte contre le changement climatique est le défi de l'Humanité pour le XXI<sup>e</sup> siècle. Cet enjeu global n'est toutefois pas la seule préoccupation environnementale. Les biologistes alertent en effet sur une sixième extinction de masse en cours des espèces vivantes – la première depuis la disparition des dinosaures non-aviens. L'occupation des sols et la pollution locale de l'air, de l'eau et de la terre sont pointées du doigt comme des causes importantes. Ces pollutions affectent aussi la santé humaine. Au regard de ces enjeux, le nucléaire est reconnu comme l'une des énergies les plus performantes.

Sa faible empreinte au sol est considérée comme un facteur clef pour préserver la biodiversité. En effet, d'après l'AIEA<sup>35</sup>, les centrales nucléaires sont, avec les centrales à gaz et les centrales hydroélectriques, celles qui produisent le plus d'énergie par mètre carré sur l'ensemble de leur cycle de vie. De fait, L'Agence internationale pour les énergies renouvelables (IRENA)<sup>36</sup> calcule qu'il faut 0,1 m<sup>2</sup> pour produire 1 MWh avec le nucléaire, contre 1 pour le gaz naturel, 1,3 pour l'éolien et 15 pour le solaire photovoltaïque. Une faible empreinte au sol qui permet de prévenir la bétonisation des territoires et de préserver des espaces pour les laisser à la nature ou à des activités agricoles.

75 des plus grands experts mondiaux en biologie de la conservation ont pris position pour expliquer que le nucléaire était l'énergie la plus respectueuse de la biodiversité<sup>37</sup>. Ces principaux coauteurs rappellent ainsi que « *pour réduire au minimum les dommages directs à la biodiversité, les meilleures options énergétiques sont celles qui réduisent la pollution, réduisent la fragmentation de l'habitat et présentent un faible risque d'accident* ». Au regard de ces critères, l'énergie nucléaire ressort comme l'une des meilleures solutions.

Les Nations unies estiment<sup>38</sup> que 7 millions de personnes meurent chaque année dans le monde en raison de la pollution de l'air liée aux activités humaines, davantage que des maladies comme le sida et la tuberculose et les accidents de la route cumulés. La production et la consommation d'énergie, charbon en tête, en sont les principaux responsables, avec 85 % des particules fines et de la quasi-totalité des oxydes de soufre et d'azote. Dans ce contexte, l'énergie nucléaire est un véritable atout. À la différence des énergies fossiles, elle n'émet dans l'atmosphère ni particules fines, ni dioxyde d'azote, ni dioxyde de soufre.

35 – Nuclear Power and Sustainable Development, AIEA, 2016.

36 – [https://static1.squarespace.com/static/5694c48bd82d5e9597570999/t/593a4294b8a79b-4be75f6078/1496990366441/Energy+and+Land+Use\\_U\\_Fritsche.pdf](https://static1.squarespace.com/static/5694c48bd82d5e9597570999/t/593a4294b8a79b-4be75f6078/1496990366441/Energy+and+Land+Use_U_Fritsche.pdf)

37 – Key role for nuclear energy in global biodiversity conservation, 2014.

38 – <http://www.unenvironment.org/news-and-stories/press-release/7-million-deaths-annually-linked-air-pollution-who-report>



## 4. Le nucléaire sera indispensable, au côté des énergies renouvelables, pour atteindre les objectifs de décarbonation

Dans son rapport spécial sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C, publié le 8 octobre 2018, le GIEC confirme le rôle du nucléaire dans les scénarios de décarbonation :

- Parmi les 4 stratégies différentes (P1-P4) de réduction des émissions<sup>39</sup> pour limiter le réchauffement climatique à 1,5 °C en 2100, le nucléaire augmente dans toutes par rapport à 2010, de 59-106 % d'ici 2030, de 98-501 % d'ici 2050.
- Sur les 89 scénarios 1,5 °C étudiés<sup>40</sup>, la production nucléaire (valeur médiane) augmente de plus du double entre 2020 et 2050 (de 10,84 EJ à 22,64 EJ). Sa part dans le mix électrique global reste significative à près de 9 % (8,87 %) en 2050.

### **La décarbonation du système électrique est au cœur des enjeux climatiques**

#### **Un secteur fortement émetteur, présentant un vrai potentiel de décarbonation**

Le secteur électrique représente aujourd'hui 40 % des émissions de gaz à effet de serre mondiales et est au cœur des enjeux climatiques. Les centrales à charbon et à gaz représentent toujours 63 % de la production totale d'électricité dans le monde. À elles seules, les centrales à charbon sont responsables de 73 % des émissions de CO<sub>2</sub> de la production d'électricité.

De fait les études qui ont exploré les moyens de parvenir à une décarbonation profonde d'ici 2050 se sont d'abord concentrées sur le potentiel de transformation du secteur électrique, car les coûts de réduction des émissions de gaz carbonique dans ce secteur sont initialement plus bas que dans les autres secteurs énergétiques, en particulier dans les transports et dans de nombreux secteurs industriels.

#### **Décarboner l'électricité représente pourtant un défi considérable**

En 2014, le GIEC fixait un objectif de 80 % d'électricité bas carbone en 2050 pour limiter la hausse des températures à 2 °C. Avec la révision à la hausse des objectifs à 1,5 °C après l'accord de Paris, les principaux scénarios exigent

39 – [http://report.ipcc.ch/sr15/pdf/sr15\\_spm\\_final.pdf](http://report.ipcc.ch/sr15/pdf/sr15_spm_final.pdf)

40 – [http://report.ipcc.ch/sr15/pdf/sr15\\_chapter2.pdf](http://report.ipcc.ch/sr15/pdf/sr15_chapter2.pdf)

maintenant une décarbonation complète du système électrique à l'horizon 2050, avec des émissions négatives au-delà (neutralité carbone).

Ceci constitue une rupture très forte, pour un système qui présente une très grande rigidité et n'évolue que très lentement : le système énergétique mondial est aujourd'hui organisé autour de lourdes infrastructures qui acheminent les énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz) depuis le gisement jusqu'au consommateur final. La tendance actuelle reste au développement de ces infrastructures, comme en témoigne en Europe le projet Nord Stream 2. Elle est d'autant plus difficile à inverser que les ressources fossiles restent très abondantes et bon marché, en l'absence d'un prix du CO<sub>2</sub> significatif.

À l'inverse de la tendance actuelle, décarboner le secteur électrique suppose en particulier, à partir de 2020-2030, de ne plus développer de moyens de production qui émettent du CO<sub>2</sub> dans l'électricité à l'échelle mondiale : donc de compter essentiellement sur l'hydraulique, le nucléaire, les autres énergies renouvelables comme les éoliennes ou le photovoltaïque, et de ne plus construire de centrales à charbon ou à gaz sans systèmes de capture-stockage du CO<sub>2</sub> (CCS).

La barre est d'autant plus élevée que, d'ici 2050, la demande d'électricité est amenée à doubler<sup>41</sup> et ceci malgré les progrès attendus en matière d'efficacité énergétique.

Plusieurs facteurs contribueront à cette augmentation :

- La population mondiale devrait atteindre 9,6 milliards de personnes en 2050<sup>42</sup>. Selon les Nations unies, à l'horizon 2050, les deux tiers de l'Humanité, soient 6 milliards de personnes, vivront dans des villes. L'Inde à elle seule comptera 400 millions de citoyens supplémentaires. La bataille du climat, comme celle de la pollution, se jouera dans ces zones à forte densité. L'électrification massive des usages semble être la seule solution pour limiter, dans le futur, à la fois les émissions de CO<sub>2</sub> et la pollution de ces mégapoles.
- Les pays émergents ont des besoins légitimes et indispensables de développement : 1,2 milliards<sup>43</sup> de personnes – l'équivalent de la population de l'Inde ou de l'Afrique – n'ont pas encore accès à l'électricité aujourd'hui.
- L'électricité bas carbone sera nécessaire pour décarboner les autres secteurs, en particulier celui des transports. En outre, le développement des nouvelles technologies représente à lui seul entre 6 % et 10 % de la consommation mondiale d'électricité, soit près de 4 % de nos émissions de gaz à effet de serre.

41 – World Energy Outlook 2014, Figure 6.2.

42 – [http://esa.un.org/wpp/documentation/pdf/wpp2012\\_press\\_release.pdf](http://esa.un.org/wpp/documentation/pdf/wpp2012_press_release.pdf)

43 – <http://documents.banquemondiale.org/curated/fr/2013/01/17747859/global-tracking-framework-vol-1-3-resume-general>

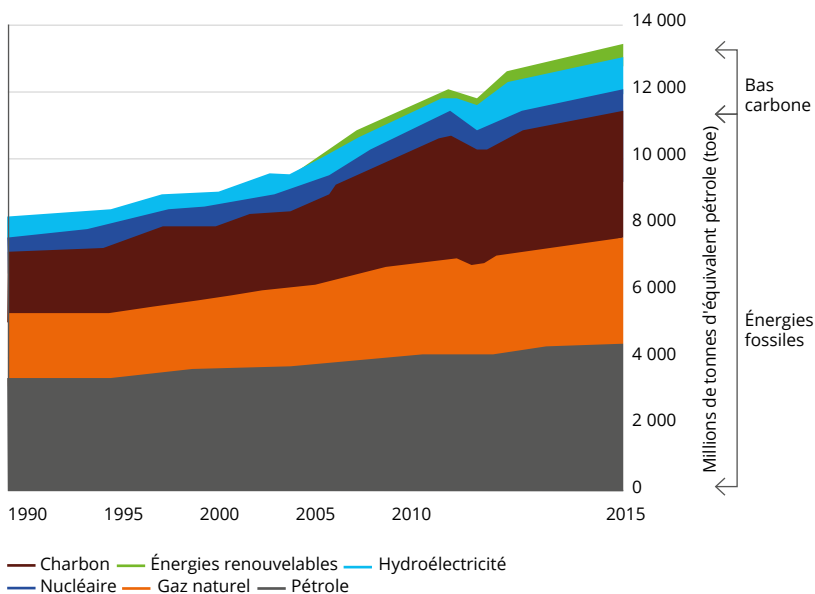
**En dépit d'investissements massifs, les énergies renouvelables ne suffisent pas à elles seules à soutenir le rythme de décarbonation nécessaire**

D'après Bloomberg Energy Finance<sup>44</sup>, les investissements dans les énergies renouvelables, principalement dans l'éolien et le solaire, ont représenté dans le monde près de 300 milliards de dollars par an depuis 2010. Bénéficiant d'un fort support politique et de gains de compétitivité, en particulier dans le solaire, ces investissements ont dépassé, dans de nombreux cas, les prévisions qu'avaient faites les agences officielles. 2016 en particulier a été une année record : les projets dans les énergies renouvelables ont représenté deux tiers des installations nettes de nouvelles capacités électriques dans le monde<sup>45</sup>.

Pourtant, sur la moyenne des dix dernières années, l'intensité carbone de l'électricité n'a baissé que très lentement, de l'ordre de 0,5 % par an. L'atteinte des objectifs de 2 °C nécessiterait une baisse huit fois supérieure, de l'ordre de 4 %<sup>46</sup> par an.

Figure 11 : Le principal dilemme est de parvenir à augmenter la production d'énergie de manière exponentielle tout en limitant le changement climatique.

Source : The Shift Project, 2018.



NOTE SFEN - OCTOBRE 2018

44 - <https://www.bnef.com/dataview/clean-energy-investment/index.html>

45 - <https://www.iea.org/publications/renewables2017/>

46 - IEA, ETP, June 2017.

**Les institutions internationales estiment qu'il faudra mobiliser l'ensemble des technologies bas carbone (renouvelables, nucléaire et CCS), aujourd'hui minoritaires, pour réduire les émissions de gaz à effet de serre**

### Scénarios 2DS/B2DS de l'OCDE-AIE

En juin 2017, l'AIE a publié de nouveaux scénarios, dont le scénario 2DS (limitation du réchauffement climatique à 2 °C en 2100) et le B2DS (« Beyond 2DS », 1,75 °C en 2100). Ces scénarios ont fait l'objet de relectures par 300 experts d'horizons variés, notamment du monde académique et de nombreuses institutions. L'AIE y recommande des actions dans tous les secteurs, et s'appuie sur un large portefeuille de technologies, permettant à la fois de satisfaire la demande croissante en énergie tout en réduisant les émissions.

Les nouveaux scénarios 2DS et B2DS reposent sur une forte électrification des usages : l'électricité représenterait près du quart de la demande totale d'énergie en 2060. Dans le 2DS et le B2DS, elle devient le plus grand vecteur énergétique final, légèrement devant le pétrole. Le changement est particulièrement notable dans le secteur des transports.

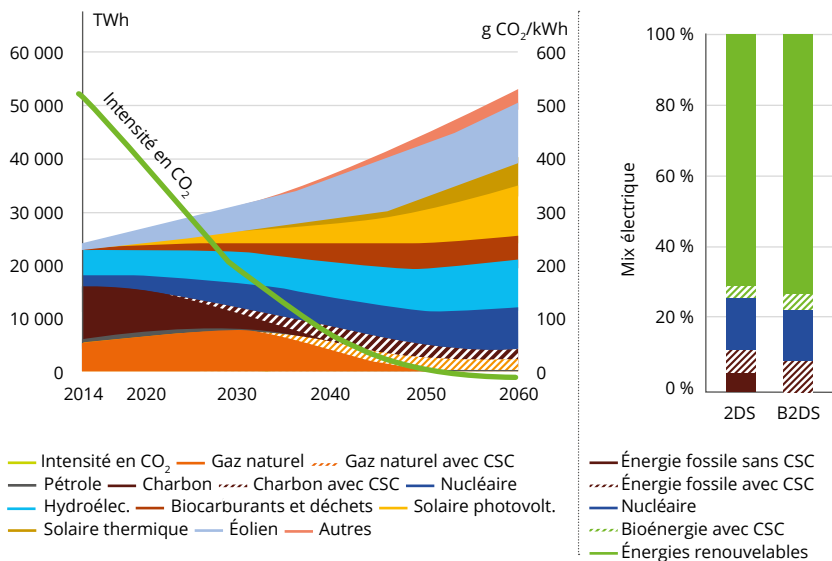
Dans le scénario 2DS, l'AIE vise désormais une totale décarbonation du secteur mondial de l'électricité d'ici 2060. Dans le scénario B2DS, les émissions deviennent négatives. Les deux nécessitent le déploiement à grande échelle de toutes les technologies bas carbone disponibles – renouvelables, nucléaire, et combustibles fossiles avec CCS.

Dans le scénario 2DS, le nucléaire représente 10 % du mix électrique en 2050. Dans le scénario B2DS, où la contrainte est plus sévère, sa part de production représente 15 % en 2060, correspondant à un doublement de la capacité installée pour atteindre 1 062 GW d'ici 2060. La Chine à elle seule représente 28 % de la capacité mondiale, le reste de la capacité restant très concentrée dans l'OCDE. En parallèle, il est important de relever que l'analyse par l'AIE des progrès des technologies bas carbone<sup>47</sup> est désormais très réservée concernant les perspectives de déploiement du CCS – technologie encore embryonnaire – pour contribuer à l'effort de décarbonation. Ces difficultés impliquent que la mobilisation de l'ensemble des autres technologies bas carbone – renouvelables et nucléaire – jouera un rôle d'autant plus important.

47 – <https://www.iea.org/tcep/>

Figure 12 : Production mondiale d'électricité dans le scénario B2DS (gauche) et mix de production électrique dans les scénarios 2DS et B2DS (droite) en 2060.

Source : Données 2014 de l'AIE, 2016a, 2016c.



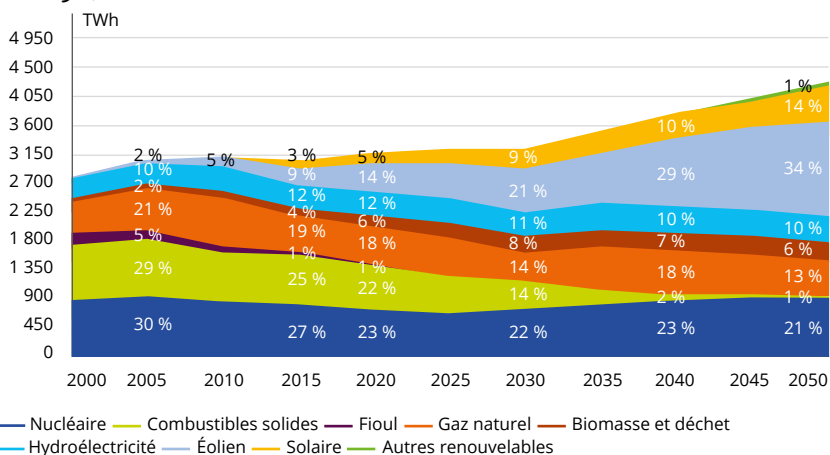
### Scénarios PRIMES de l'Union européenne

Les scénarios développés pour la Commission européenne dans le cadre du projet « Une énergie propre pour tous les Européens » (« Clean Energy for All Europeans ») de 2016 reposent sur le modèle PRIMES<sup>48</sup>. Ce modèle offre la possibilité de construire des trajectoires cohérentes des prix du carbone qui permettent d'atteindre les objectifs fixés par la Commission européenne aux horizons 2030 et 2050. Le scénario EUCO30 permet ainsi d'atteindre les objectifs de développement des renouvelables et d'efficacité énergétique fixés par l'Union européenne, et de réduire les émissions de gaz à effet de serre de plus de 80 % en 2050.

À l'horizon 2050, le scénario EUCO30 évalue le socle nucléaire nécessaire à 20 % du mix électrique européen, pour une capacité de 110-120 GW de nucléaire. Ceci nécessiterait non seulement un effort de rénovation du parc actuel pour l'exploiter dans la durée, mais aussi un effort de renouvellement du parc avec 100 GW de nouvelles installations. À noter que la capacité nucléaire en France est évaluée à 40 GW dans ce scénario, ce qui correspond à la nécessité de construire entre quinze et vingt réacteurs de type EPR entre 2030 et 2050 pour renouveler le parc nucléaire actuel.

48 – <https://ec.europa.eu/energy/en/data-analysis/energy-modelling>

Figure 13 : Production nette d'électricité par type de centrale dans le scénario EUCO30.



Le scénario EUCO30 confirme aussi l'importance de l'électricité comme moyen de décarbonation de l'ensemble du mix énergétique. Si la croissance de la consommation électrique reste modérée dans l'Union d'ici 2030, elle croît de nouveau à partir de 2030 de manière significative afin de permettre de décarboner les transports. À partir de 2050, une nouvelle croissance de la consommation électrique pourrait s'avérer de nouveau nécessaire, afin de passer au stade de la « décarbonation profonde », permettant de produire du gaz propre (méthane de synthèse) et de l'hydrogène (électrolyse de l'eau).

## Les scénarios 100 % renouvelables font l'objet de nombreuses critiques

En avril 2017, quatre chercheurs australiens<sup>49</sup> ont répertorié et analysé les scénarios 100 % renouvelables publiés dans le monde selon plusieurs critères, dont : la cohérence avec les prévisions de besoins et de comportements de la population, la sécurité d'approvisionnement et l'équilibre du système électrique. Ils ont constaté qu'aucun des 24 scénarios étudiés ne fournissait de preuve convaincante de faisabilité. Ils concluaient alors que ces travaux « *semblent avoir considérablement sous-estimé le défi à relever, et ont retardé la recherche et la mise en œuvre de voies efficaces et complètes de décarbonation* ».

En juin 2017, vingt scientifiques américains<sup>50</sup> ont réfuté aussi une étude 100 % renouvelables portée par un universitaire de Stanford dans la même revue académique prestigieuse où elle avait été initialement publiée. Ils ont aussi déclaré qu' « *une politique trop ambitieuse sur les avantages d'un portefeuille trop étroit d'options technologiques pourrait être contre-productive, entravant sérieusement le passage à un système énergétique décarboné* ».

En France aussi, les scénarios 100 % renouvelables électriques montrent leurs limites. Ces scénarios ont pu être présentés comme une « démonstration » que la France n'aurait plus besoin, à l'horizon 2050, d'un socle nucléaire. Il semble important de placer ses études dans leur contexte, et aussi d'en rappeler les contraintes méthodologiques.

### Étude ADEME<sup>51</sup> de juin 2016

Cette étude, conçue comme un exercice conceptuel et statique, posait la question de savoir, non pas comment réduire encore les émissions de CO<sub>2</sub>, mais s'il était possible ou non, du point de vue de l'équilibre temporel du réseau, de dépasser telle ou telle part des renouvelables dans le mix électrique, avec quelle quantité de stockage par exemple. Pour cet exercice, elle suppose qu'un parc neuf serait construit *ex nihilo* en 2050 avec les technologies avancées supposées disponibles à cette date (avec des hypothèses plutôt volontaristes sur le stockage et le prix du CO<sub>2</sub>). Dans la réalité, même si une technologie devient compétitive entre 2040 et 2050, rien ne permet de conclure, avec les temps d'inertie de déploiement, qu'elle aurait une part significative en 2050, surtout dans le contexte supposé de décroissance de la consommation, peu favorable aux nouveaux investissements. Comme le dit un des auteurs<sup>52</sup>, elle ne visait d'ailleurs pas à « *déterminer une trajectoire d'évolution du mix électrique entre 2015 et 2050* ». Dans la réalité aussi se poserait la question de l'acceptabilité

49 – Researchgate "Burden\_of\_proof\_A\_comprehensive\_review\_of\_the\_feasibility\_of\_100\_renewable-electricity\_systems".

50 – <http://www.pnas.org/content/pnas/early/2017/06/16/1610381114.full.pdf>

51 – <http://www.ademe.fr/mix-electrique-100-renouvelable-analyses-optimisations>

52 – RGN 2017-1.

sociale de différentes options : ainsi le mix énergétique le plus rentable économiquement représente 94 GW d'éolien terrestre (soit 50 000 éoliennes, contre 4 000 aujourd'hui), et 10 GW d'éolien offshore (5 000 éoliennes). Enfin l'étude ne permet pas d'analyser finement la fiabilité du réseau en temps réel et à une maille géographique fine – enjeux de premier ordre pour la gestion de la variabilité des énergies renouvelables –, et fait des hypothèses optimistes concernant le foisonnement de la production renouvelable au niveau européen afin de gérer certaines périodes climatiques (exemple : anticyclone en hiver dans le nord de l'Europe).

### Étude Négawatt de janvier 2017

L'objet des travaux là encore n'est pas d'étudier comment réduire les émissions de la manière la plus rapide et la plus économique possible, avec la meilleure chance de succès. L'étude établit un modèle optimisé visant deux objectifs : éliminer à la fois les énergies fossiles et l'énergie nucléaire. Le scénario repose encore sur beaucoup d'éolien terrestre (77 GW). Surtout, le modèle impose une réduction drastique de la consommation d'énergie en France, de l'ordre de 50 % en énergie finale, dont la majorité ne peut être obtenue grâce à l'efficacité énergétique, mais à la « sobriété énergétique ». Dans ces dernières mesures, certaines correspondent à des tendances de société en cours, même si le rythme actuel n'est pas forcément en adéquation avec le modèle : c'est le cas par exemple de la baisse de la consommation de viande. D'autres en revanche ne semblent pas correspondre aux tendances de société aujourd'hui observées où, en outre, la démographie est croissante. Ainsi le modèle nécessite une densification des zones urbaines, avec à la fois une baisse de la proportion des maisons individuelles et plus de cohabitation, alors que le nombre de personnes par ménage est au contraire actuellement en diminution. Ou encore, le modèle pose pour principe l'arrêt du transport aérien sur moins de 800 kilomètres, alors que le trafic aérien, favorisé par les offres low-cost et l'aspiration aux voyages, est en augmentation constante.

Une étude de l'Alliance nationale de coordination de la recherche pour l'énergie (ANCRE)<sup>53</sup> a examiné la littérature mondiale en matière de systèmes électriques à forte proportion de renouvelables. Cette étude conclut notamment, à fin 2017, qu'il y a une grande profusion d'articles académiques dans le monde et de rapports d'agences gouvernementales sur le sujet. Ceux-ci reflètent l'intérêt et les préoccupations des acteurs du secteur électrique, des chercheurs du domaine de l'énergie, mais également du corps politique et des sociétés sur ces questions. Le nombre d'articles, études ou documents de recherche sur l'intégration des renouvelables variables aux réseaux électriques a atteint près de 9 750 parutions ou documents assimilés depuis 1978. Sur cet ensemble,

53 – « Intégration des énergies renouvelables variables sur les réseaux électriques : méthodologies, scénarios et conséquences industrielles », CVT de l'ANCRE, 2018.



80 % de la littérature scientifique a été publiée depuis 2010. Le rapport propose aussi une enquête qui montre que les chercheurs et personnes consultées pensent majoritairement qu'il n'y a pas de maturité suffisante de la recherche pour aspirer raisonnablement à converger vers un consensus sur la question des rythmes optimaux et « limites » à la croissance des renouvelables variables dans les parcs.

La seule conclusion qui vaille est qu'il y a des espoirs significatifs pour décarboner l'électricité mondiale avec des renouvelables dans les prochaines décennies. C'est une bonne nouvelle. Il reste de nombreuses incertitudes (étude de l'ANCRE) quant aux possibilités et au rythme de développement des renouvelables, sans oublier des questions encore en suspens sur les métaux et matières critiques nécessaires à ces énergies. Il faut donc considérer les solutions nucléaires et renouvelables ensemble, dans une vision systémique, et diversifier le mix en développant renouvelables et nucléaire là où c'est possible d'abord : Europe, Asie, États-Unis + Canada, etc.

## 5. L'énergie nucléaire a le potentiel aujourd'hui pour décarboner plus et plus rapidement

**Le nucléaire est industriellement disponible aujourd'hui dans tous les grands pays émetteurs de gaz à effet de serre de la planète et est une véritable alternative au charbon**

Les plus gros pays émetteurs disposent déjà de l'énergie nucléaire dans leur mix énergétique : la Chine, les États-Unis, l'Inde, la Russie, le Japon, l'Allemagne, la France, la Corée du Sud, le Canada, le Brésil, le Royaume-Uni, l'Afrique du Sud. Ces pays qui contribuent à plus de 60 % des émissions mondiales possèdent déjà la technologie pour développer le nucléaire civil, comme la France l'a fait dans les années 1980. L'énergie nucléaire n'est certainement pas la solution à tout.

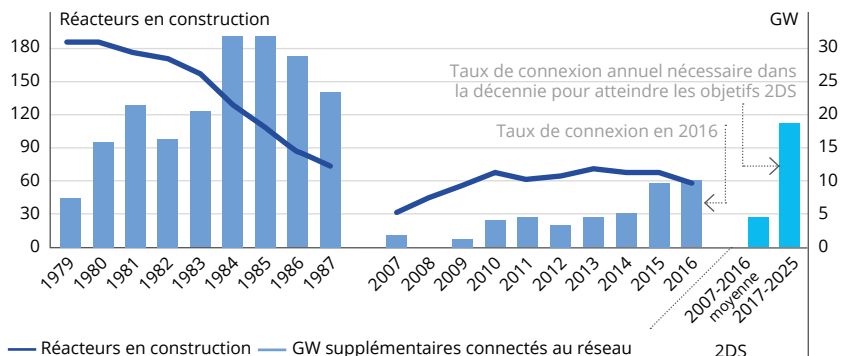
De nombreux pays ne disposent pas encore des structures industrielles et sociales qui sont nécessaires au développement du nucléaire en toute sûreté. Mais ces structures sont bien présentes en Europe, aux États-Unis, en Chine ou en Inde par exemple.

Si ces pays abandonnaient l'usage du charbon pour la production électrique et le remplaçaient par du nucléaire, on aurait déjà fait une bonne partie du chemin. L'énergie nucléaire est une énergie mature qui a déjà permis de limiter les émissions de CO<sub>2</sub> dans de nombreux pays.

En prenant en compte la part des unités actuelles ou en construction qui seront en opération en 2060, le scénario B2DS nécessite la construction de nouvelles capacités nucléaires de 23 GW par an en moyenne entre 2017 et 2060, soit le double de la capacité de 10 GW qui ont été ajoutés en 2015 et 2016.

Figure 14 : Cumul de capacités et réacteurs en construction.

Source : AIE.



L'énergie nucléaire peut contribuer aujourd'hui à une décarbonation plus rapide du système électrique : par une prolongation de l'exploitation des réacteurs existants (ou leur redémarrage, comme dans le cas du Japon), par une accélération des programmes de nouvelles constructions en cours qui visent soit au renouvellement du parc, soit à augmenter la capacité de production actuelle.

Aujourd'hui, la Chine, les États-Unis et l'Union européenne représentent à eux seuls plus de la moitié des émissions mondiales de CO<sub>2</sub><sup>54</sup>. Ces régions possèdent, ainsi que tous les autres grands pays émetteurs aujourd'hui, tels que le Japon, la Russie, l'Inde, le Brésil, et l'Afrique du Sud, la maîtrise technologique et industrielle de l'énergie nucléaire, afin de produire massivement l'électricité bas carbone dont ils ont besoin.

La Chine en particulier possède plus d'une dizaine de réacteurs en construction aujourd'hui.

54 - Source : WRI.

Figure 15 : Atlas de la pollution : le monde en émissions de dioxyde de carbone.

Source : The Guardian.

Rang/changement en 2008	Pays	Million de tonnes en 2009	% changement 08-09
1	Chine	7 711	13,3
2	États-Unis	5 425	-7,0
3	Inde	1 602	8,7
4	Russie	1 572	-7,4
5	Japon	1 098	-9,7
6	Allemagne	766	-7,0
7	Canada	541	-9,6
8	Corée du Sud	528	1,2
9	Iran	527	3,2
10	Grande-Bretagne	520	-7,8
11	Arabie saoudite	470	3,2
12	Afrique du Sud	450	-6,7
13	Mexique	444	-1,9
14	Brésil	420	-0,3
15	Australie	418	-1,8
16	Indonésie	413	2,4
17	Italie	408	-9,3
18	France	397	-7,4
19	Espagne	330	-8,4
20	Taiwan	291	-3,7

Figure 16 : Réacteurs en activité (total : 454).

Source : AIEA, PRIS, sept. 2018.

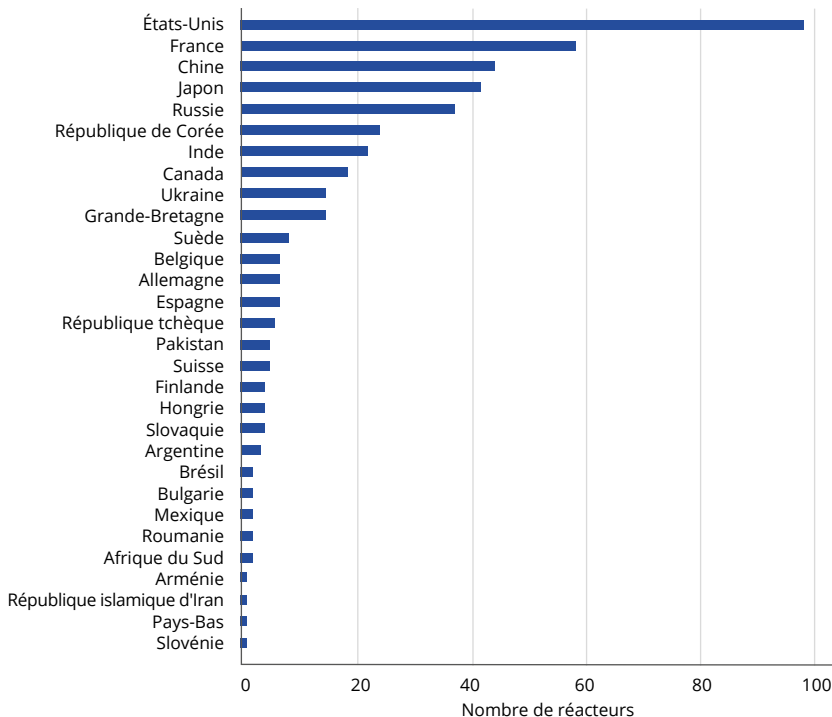
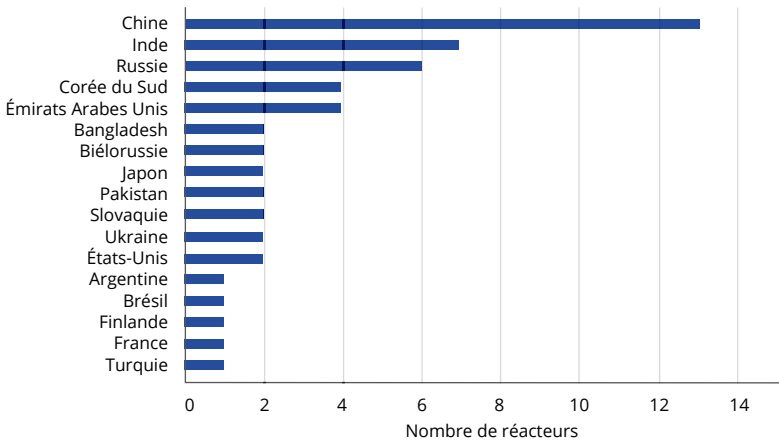


Figure 17 : Réacteurs en construction (total : 55).

Source : AIEA, PRIS, sept. 2018.



Le charbon est aujourd'hui le moyen de production le plus émetteur de gaz à effet de serre, et aussi le plus polluant. En Europe, selon une étude WWF, il est responsable à lui seul de 20 000 décès<sup>55</sup> prématurés par an.

Le charbon domine aujourd'hui le mix électrique des grands pays émergents que sont la Chine (70 %), l'Inde (75 %) ou l'Afrique du Sud (92 %), mais est aussi encore très présent en Europe (25 %) et aux États-Unis (30 %)<sup>56</sup>. Le succès du charbon tient à plusieurs motifs : il permet de produire de l'électricité de manière massive, 24 h/24, et contribue de manière forte à la sécurité d'approvisionnement. Son abondance et sa bonne répartition dans le monde présentent aussi des bénéfices en matière de coûts de production et d'indépendance énergétique.

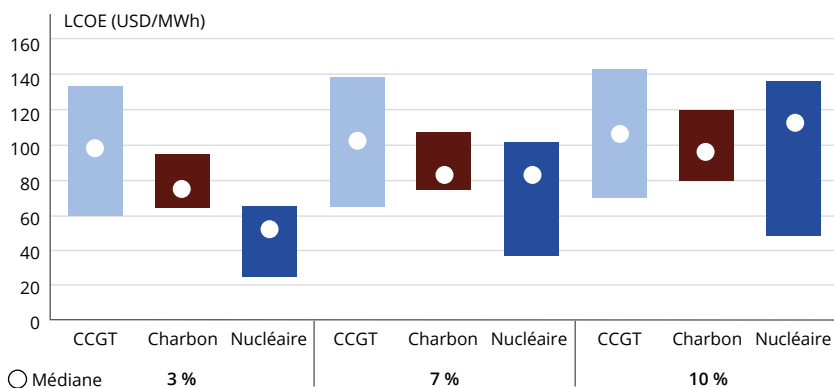
Le nucléaire offre, sur l'ensemble de ces critères, une très bonne alternative au charbon. Il permet d'abord lui aussi de produire de l'électricité de manière massive, avec une disponibilité moyenne de l'ordre de 90 %. Il offre une bonne indépendance énergétique : l'uranium ne représente que 5 % de son coût au kilowattheure, et les ressources en uranium sont bien réparties dans le monde (40 % des réserves connues sont dans les pays de l'OCDE). Enfin, l'OCDE a démontré en 2015 que la compétitivité des nouveaux projets nucléaires est amenée à se renforcer, avec une hausse attendue du prix du carbone.

55 – <https://sandbag.org.uk/project/europes-dark-cloud-how-coal-burning-countries-make-their-neighbours-sick/>

56 – OPEC.

**Figure 18 : LCOE ranges for baseload technologies (at each discount rate).**

The ranges presented results from all countries analysed in this study, and therefore obscure regional variations.  
Source : Projected Costs of Generating Electricity, OCDE, 2015.



En 2050, près du tiers de la population mondiale vivra en Inde et en Chine. Ces deux pays ont un système électrique basé en majorité sur le charbon, et ont fait le choix de développer des programmes nucléaires importants. Au-delà des questions climatiques, un des grands bénéfices, immédiatement perceptible par les populations, de la substitution du charbon par du nucléaire est de lutter contre la pollution de l'air. Celle-ci est considérée aujourd'hui comme le premier fléau dans les grandes villes chinoises ou indiennes, en matière de qualité de vie et aussi de santé publique.

### La Chine

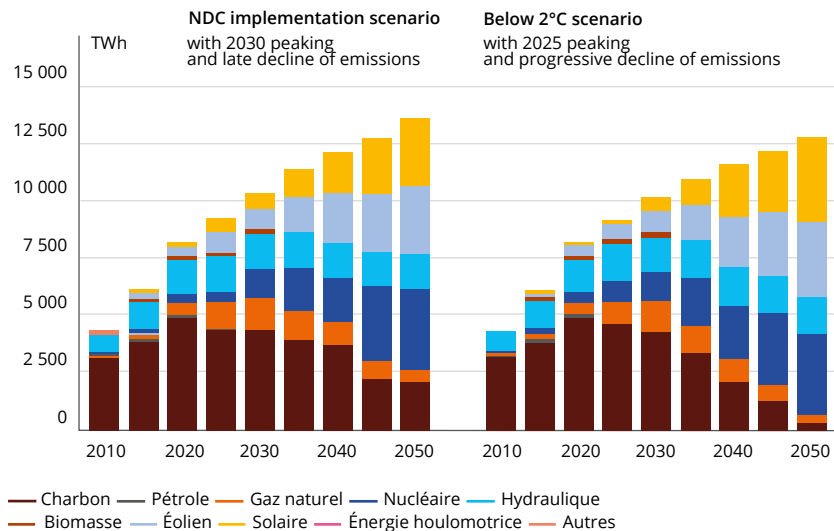
La Chine vise officiellement une capacité nucléaire installée de 58 GW d'ici 2020, contre près de 36 GW aujourd'hui. À plus long terme, l'objectif de la Chine est de disposer de 110 unités nucléaires en exploitation commerciale d'ici 2030, mais cet objectif devrait être ajusté dans le prochain plan quinquennal, dont la première version paraîtra en 2019.

Les scénarios de transition<sup>57</sup> visant à éliminer le charbon publiés par l'Institut du développement durable et des relations internationales (IDDRI), qui prennent en compte les données sociales et économiques, montrent la part importante qui est attendue pour le nucléaire en Chine, à la fois dans sa contribution de décarbonation nationale (INDC) préparée à l'occasion de la COP21, mais aussi dans les scénarios de décarbonation 2050, comme l'illustre la figure 19.

57 - <https://www.iddri.org/sites/default/files/PDF/Publications/Catalogue%20iddri/Rapport/201809-Synthese%20Report%20iddri-COALTRANSITIONS-def.pdf>

Figure 19 : La Chine.

Source : Université Tsinghua, Chine.



## L'Inde

L'Inde, qui devrait compter 1,5 milliard d'habitants en 2030, est de son côté confrontée à un double défi. D'une part, l'AIE a prévu un triplement de la demande d'électricité d'ici 2040. De l'autre, le pays étant devenu en quelques années le troisième plus grand émetteur de la planète, il devra réduire ses émissions de gaz à effet de serre.

L'Inde a développé sa propre technologie d'énergie nucléaire dès les années 1960. Sa production en 2016 était de 38 TWh, soit seulement 2,6 % de sa production totale, soit 50 fois moins que la production d'électricité à base de charbon, mais proche de la production solaire et éolienne (59 TWh). Le gouvernement prévoit de passer à la vitesse supérieure à la fois sur les renouvelables et sur le nucléaire. Il prévoit l'installation de 20 GW nucléaires (contre 5,8 GW aujourd'hui) et de 63 GW en 2032. Les énergies renouvelables ne sont pas en reste : d'ici 2022, 60 GW d'éolien et 100 GW de solaire devraient être installés. À plus long terme, l'Inde ambitionne de devenir un des leaders mondiaux dans la conception des réacteurs à neutrons rapides et dans le cycle du thorium, minéral dont elle dispose des plus grandes réserves mondiales.

## Le Japon<sup>58</sup>

De la même façon que le nucléaire est une bonne alternative au charbon, le risque est grand de voir le charbon comme une alternative au nucléaire, dans la mesure où il permet d'avoir une production massive d'électricité 24 h/24. Depuis 2011, le pays a réorganisé le contrôle de la sûreté pour l'aligner sur celui de pays comme la France et a organisé le redémarrage de ses réacteurs nucléaires selon un processus de revue de sûreté détaillé. Ainsi, au Japon, en raison du redémarrage très lent des centrales nucléaires, et des limites liées à la production d'énergies renouvelables compte tenu des conditions géographiques et météorologiques de l'archipel, les compagnies électriques ont démarré 8 nouvelles centrales à charbon ces deux dernières années, et ont en projet au moins 36 nouvelles unités pour les dix prochaines années. Ces projets ne sont pas compatibles avec l'objectif de baisser de 26 % les émissions de CO<sub>2</sub> entre 2013 et 2030. Il est stratégique que le Japon puisse redémarrer de ce fait rapidement ses réacteurs nucléaires : dans son INDC présenté à la COP21, le pays prévoit une part de l'énergie nucléaire équivalente à 20 % de la production totale d'électricité d'ici 2030, soit une trentaine de réacteurs redémarrés.

## Les États-Unis

En 2015, les centrales à charbon américaines ont représenté encore 40 % de la production électrique américaine. Près de 70 % d'entre elles ont plus de 40 ans. Dans les États où elles opèrent, ces centrales sont des éléments clef de la sécurité d'approvisionnement électrique : elles fonctionnent de manière continue, « en base ». En l'absence d'autres moyens pilotables suffisants sur le réseau électrique où elles opèrent (le réseau américain est très fragmenté), elles ne peuvent être remplacées que par d'autres centrales pilotables, donc par des centrales à gaz ou du nouveau nucléaire (comme par exemple les nouveaux petits réacteurs modulaires). À la différence des centrales à gaz néanmoins, ces réacteurs modulaires produisent une électricité bas carbone et ont un potentiel de décarbonation très largement supérieur.

En avril 2018, l'État du New Jersey a décidé de voter des mesures (« Clean Energy Package ») pour éviter la fermeture cette fois-ci des centrales de Hope Creek et Salem, exploitées par l'électricien PSEG, lesquelles pourraient entraîner là encore une nouvelle augmentation des émissions de CO<sub>2</sub>. Les mesures créent en particulier, dans un cadre de marché dérégulé où les centrales nucléaires sont en concurrence avec les centrales à gaz, une compensation financière pour les centrales nucléaires de 11€/MWh qui rémunère la propriété bas carbone de leur électricité. Le New Jersey est devenu ainsi le troisième État américain, après l'Illinois et l'État de New York, à reconnaître qu'il ne pourrait pas mener une vraie politique de réduction des émissions sans soutenir ses centrales nucléaires face aux énergies fossiles.

58 - <https://www.businessinsider.com/japan-moving-back-to-coal-2018-5?IR=T>



## La Pologne

La Pologne dispose des plus grosses réserves de charbon en Europe. En 2015, ce dernier représentait plus de 80 % de sa production d'électricité, pour des émissions proches de 900 g/kWh, de très loin la plus élevée d'Europe.

Dans ce contexte, la mise en service de centrales nucléaires présente un potentiel de décarbonation très élevé. Dans son plan présenté à l'AIEA en septembre 2018, le gouvernement polonais prévoit, d'ici 2030, d'investir à la fois dans les renouvelables (de 14 % du mix aujourd'hui à 20 %) et d'atteindre 6 % de sa production par du nucléaire. En septembre 2018, le ministre polonais<sup>59</sup> de l'Énergie déclarait que le pays « *ne pourra pas satisfaire les objectifs d'émissions de l'Union européenne s'il ne construit pas de centrale nucléaire* ».

Le gouvernement travaille depuis 2009 sur un projet de deux premières centrales nucléaires. Il est aussi engagé, aux côtés de l'Union européenne, dans un programme de R&D portant sur des réacteurs à haute température qui permettraient d'alimenter en chaleur des installations industrielles actuellement alimentées par du gaz, et d'éviter les émissions de 14-17 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> en Pologne chaque année.

### **L'exemple français montre que la flexibilité de l'énergie nucléaire rend possible le développement des énergies renouvelables variables**

Le développement des énergies renouvelables variables, éolien et solaire photovoltaïque, transforme profondément les systèmes électriques. En raison de la variabilité de la production renouvelable, qui dépend des conditions météorologiques (ensoleillement, force du vent), l'ensemble du système électrique doit pouvoir s'adapter rapidement afin d'assurer l'équilibre du réseau électrique à tout instant, grâce à des moyens de production pilotables (charbon, gaz, nucléaire) ou par des moyens de stockage.

En France, la production du parc nucléaire s'adapte déjà aux variations de la demande. Au niveau intersaisonnier, les arrêts de tranche sont planifiés en été, pendant le creux de demande. Au niveau journalier et infrajournalier, la majorité des réacteurs nucléaires peut moduler sa puissance jusqu' à 80 % en moins de 30 minutes. Cette flexibilité contribue à gérer l'intermittence de la production renouvelable et limite les coûts de système qui leur sont associés.

Les scénarios de l'IDDRI/Agora-Energiewende<sup>60</sup> montrent comment le parc nucléaire français existant contribue aussi fortement à la décarbonation des systèmes électriques de nos voisins, à la fois par ses capacités en puissance ainsi que par sa flexibilité.

59 – <https://uk.reuters.com/article/uk-poland-energy/planned-nuclear-plant-will-help-poland-meet-eu-emissions-target-minister-idUKKCN1LL10W>

60 – <https://www.iddri.org/sites/default/files/PDF/Publications/Hors%20catalogue%20iddri/201803FR-ID-DR1%20AGORA%20Energy%20transition-summary.pdf>

Le nucléaire français s'insère dans le système électrique européen et participe à chaque instant à son fonctionnement. La production nucléaire en base, en France comme dans les autres pays, en particulier en Europe de l'Est, constitue d'abord un apport majeur en électricité bas carbone. Les exportations françaises, dues largement à la disponibilité d'un nucléaire très compétitif, apportent près de 50 TWh/an à nos voisins.

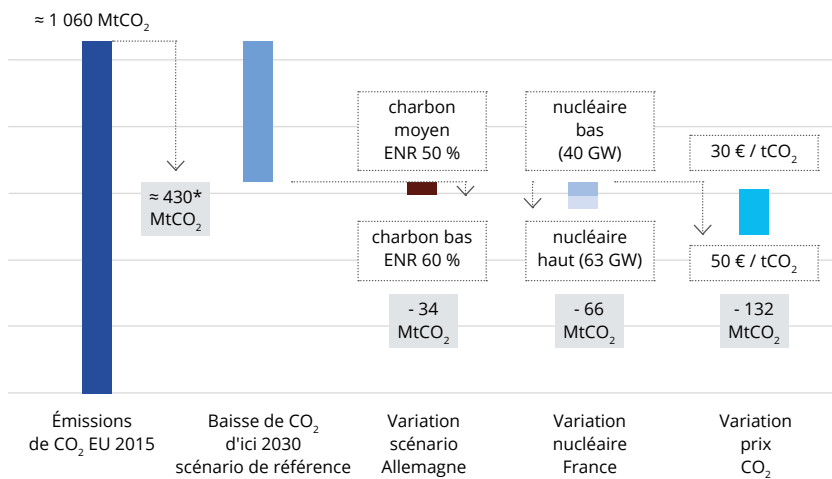
Un deuxième mécanisme, souvent méconnu, est le rôle essentiel que joue le nucléaire français dans la gestion de la variabilité de l'offre d'électricité européenne, laquelle croît avec l'augmentation du parc en renouvelables. Cette participation à l'équilibrage du réseau européen ne se manifeste pas par un bilan exportateur. En effet, dans les moments où les renouvelables produisent à un niveau de puissance élevé, on constate en France des importations en provenance d'Allemagne notamment. Dans les moments où les renouvelables produisent peu, la présence d'un nucléaire flexible en France réduit le recours à des unités à gaz ou à charbon dans les pays qui disposent d'importants parcs renouvelables.

Ainsi, même si l'analyse des exportations nettes n'est pas suffisante pour mettre en évidence l'apport du parc nucléaire, elle permet de quantifier au moins une part de ces effets. Le graphique suivant (dû à l'IDDRI) montre comment un nucléaire français à un niveau constant (63 GW) serait susceptible de contribuer à la décarbonation du kWh moyen en Europe. L'Institut expose qu'« *une baisse des capacités nucléaires, bien qu'elle n'ait qu'un effet très marginal sur les émissions de CO<sub>2</sub> françaises, [conduirait] à une hausse des émissions de CO<sub>2</sub> dans les pays voisins de la France, notamment l'Allemagne, et par effet domino dans l'ensemble des pays du système interconnecté* ». On constate ainsi que la politique énergétique et climatique française ne peut être découplée de l'Europe, ce qui engage doublement la responsabilité du pays au regard des objectifs européens : en France même et chez nos voisins.

Cet institut explique : « *En 2030, un parc nucléaire maintenu à des niveaux élevés devra opérer plus fréquemment en suivi de charge, contribuant à la flexibilité du système électrique.* » Par rapport à une situation de réduction à 50 %, un parc nucléaire français à puissance constante permettrait ainsi à l'Allemagne de diminuer ses émissions de CO<sub>2</sub> de 18 millions de tonnes par an. Étendu à l'ensemble de l'Europe, cet effet engendrerait un gain de 66 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> par an d'après l'IDDRI, via le double mécanisme décrit ci-dessus. Ce montant représente environ 15 % des émissions totales du système électrique européen à cette échéance.

## Figure 20 : Baisse des émissions de CO<sub>2</sub> en Europe entre 2015 et 2030 dans différents scénarios étudiés.

Source : ECF, 2017 ; Eurostat, TYNDP, 2016 ; analyse des auteurs sur la base des résultats du modèle Artelys Crystal Super Grid.



\* La baisse à l'horizon 2030 est une estimation, qui approxime notamment le niveau d'émissions de la production électrique par cogénération dans les différents pays européens.

## L'électricité décarbonnée rend possible la décarbonation profonde via l'électrification des usages

Dans ses scénarios de décarbonation profonde, l'AIE indique qu'il est indispensable de s'appuyer, en plus de l'efficacité énergétique, sur l'électrification des usages. L'électricité bas carbone est en effet une des pistes de décarbonation les plus prometteuses. Elle offre d'ores et déjà des solutions simples à utiliser au quotidien pour de nombreux usages (mobilité, froid, chaleur...), pouvant apporter dans de nombreux cas des bénéfices de confort supplémentaire, susceptibles de favoriser leur adoption.

Les scénarios de décarbonation européens EUCO30 montrent ainsi une augmentation de la part de l'électricité à 40 % dans le mix énergétique de l'Union européenne. Si la demande électrique est peu dynamique jusqu'à 2030, du fait de l'objectif de réduction de 30 % de l'énergie finale consommée, elle repart à la hausse à partir de 2035 en raison du besoin accru, par exemple, de décarbonation des transports, conjugué à la maturation des technologies de mobilité électrique. À partir de 2050, il s'agit alors, pour parvenir à la neutralité carbone, de décarboner les vecteurs, avec la production de carburants de synthèse (production massive d'hydrogène, méthanation), et les processus industriels.

Pour l'Union de l'industrie électrique (Eurelectric), la décarbonation complète de l'Union européenne d'ici 2050 requerra une part d'électrification de 63 % dans les transports et le bâtiment et de 50 % dans les processus industriels<sup>61</sup>.

Le succès de l'électrification des usages sera d'autant plus réel que son coût sera le plus faible possible, que ce soit celui de l'électricité directement, ou des solutions qui l'utilisent. Une étude du MIT<sup>62</sup> parue début septembre précise ainsi que dans ce contexte toutes les technologies bas carbone doivent être mobilisées, à commencer par le nucléaire, aux côtés des énergies renouvelables, du stockage ou des réseaux intelligents. Sans cela, le coût de l'électrification bas carbone sera plus élevé, et la décarbonation de nos économies beaucoup plus difficile à atteindre, économiquement comme socialement. L'étude montre ainsi que cette approche technologique ouverte réduit les coûts de la décarbonation de l'électricité de 10 à 62 %.

61 – Paris ambitions require at least 60% electrification of EU economy, Eurelectric.

62 – Role of Firm Low-Carbon Electricity Resources in Deep Decarbonization of Power Generation, Sepulveda, Nestor ; et al., MIT, septembre 2018.

## **Dans le futur, l'énergie nucléaire pourra également décarboner directement d'autres secteurs**

Les technologies nucléaires ont le potentiel pour participer à la construction d'un monde bas carbone. Cette contribution passera évidemment par l'électricité, mais pas seulement, certains réacteurs étant aussi en mesure de fournir d'autres applications bénéfiques pour l'environnement : cogénération pour produire de la chaleur pour les usages industriels ou du chauffage urbain, la production d'hydrogène ou encore d'eau douce – le tout contribuant à la flexibilité du mix électrique.

Ces applications sont à l'étude, au point que certains réacteurs sont d'abord pensés pour y répondre.

### **Produire de l'eau douce**

Changement climatique et accroissement démographique mettent les ressources en eau douce sous pression. Au <sup>xxi</sup><sup>e</sup> siècle, « l'or bleu » est déjà une ressource rare pour de nombreux pays, qui n'ont d'autre choix que de recourir au dessalement de l'eau de mer pour subvenir à leurs besoins. Les usines de dessalement n'utilisent pratiquement que des centrales thermiques pour générer de la chaleur ou de l'électricité, les deux vecteurs pouvant être utilisés séparément ou conjointement pour désaliniser. Des pays comme l'Arabie saoudite ou la Jordanie étudient déjà sérieusement l'implantation de réacteurs sur leur territoire dans une optique de production d'eau douce. L'AIEA promeut activement la désalinisation nucléaire depuis plus de deux décennies.

### **Décarboner la production d'hydrogène et de carburants de synthèse**

La consommation d'hydrogène est amenée à croître dans les prochaines décennies. Actuellement, 95 % de la production mondiale d'hydrogène est réalisée à base d'hydrocarbures. Ces méthodes sont fortement émettrices de CO<sub>2</sub> et l'hydrogène produit alimente surtout des procédés industriels (production d'ammonium, raffineries). Comme l'eau douce, l'hydrogène peut être produit à partir d'électricité, essentiellement via l'électrolyse. Des réacteurs de 300 ou 600 MW pourrait fournir respectivement l'hydrogène nécessaire pour une usine de production d'ammoniaque ou une raffinerie. La production d'autres molécules est à l'étude. La méthanation, qui permet avec la chaleur de convertir le monoxyde de carbone ou le CO<sub>2</sub> en méthane et en eau, tout comme la production de carburants de synthèse, sont d'autres débouchés.

### **Chauffer les villes, et fournir de la chaleur industrielle aux usines**

La production de chaleur est l'un des principaux postes de consommation énergétique mais également l'un des plus émetteurs de CO<sub>2</sub> compte tenu de l'hégémonie des énergies fossiles. Les centrales nucléaires, qui sont des installations thermiques pouvant (aussi) produire de l'eau chaude ou de la vapeur, constituent une solution pour alimenter les réseaux de chauffage urbain ou les sites industriels. Les réacteurs nucléaires (particulièrement les

petits réacteurs modulaires, SMR) pourraient alors être déployés en étant simplement installés en remplacement des capacités fossiles existantes.

Plus de 70 centrales nucléaires font déjà de la cogénération, produisant essentiellement de la chaleur pour les réseaux urbains. Plusieurs projets de réacteurs dédiés à la production de chaleur sont à l'étude. L'exploitant chinois CNNC étudie ainsi la faisabilité d'utiliser un projet de réacteur, le NHR200-II, pour chauffer les réseaux urbains des villes du nord du pays. Des villes finlandaises, soutenues par les Verts, étudient la possibilité de construire des SMR pour alimenter en chaleur des réseaux tels que ceux de l'agglomération d'Helsinki.

Dans le cas de la France, le potentiel de chaleur qui pourrait être produite par le nucléaire, à l'horizon 2050, serait de l'ordre de 40 à 50 TWh, d'après la récente thèse de Martin Leurent<sup>63</sup>. Cette opportunité est précieuse, la décarbonation de la chaleur étant, après les transports, un sujet majeur de la transition.

63 – « Nuclear plants as an option to help decarbonising the European and French heat sectors? A techno-economic prospective analysis », thèse de doctorat de l'université Paris-Saclay préparée à CentraleSupélec, septembre 2018.

# Rejoignez-nous

**sfen.org**

---



---

**103 rue Réaumur  
75002 Paris**

Suivez chaque semaine l'actualité de la filière en vous abonnant à notre newsletter « RGN l'Hebdo » sur [sfen.org](https://sfen.org)

La France est un des rares pays industrialisés au monde à bénéficier déjà d'une électricité décarbonée, et ceci grâce à l'énergie nucléaire. Elle est, du point de vue de sa politique climatique, dans une situation particulière.

Dans le cadre de la Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) et de la COP24 (Katowice, Pologne, décembre 2018), la SFEN formule quatre propositions :

**À l'échelle nationale d'abord, la France doit :**

- Proposition 1 : Piloter de manière prudente son mix électrique, pour ne jamais être acculée à devoir développer à court et moyen terme des centrales à gaz.
- Proposition 2 : Tirer parti de son électricité bas carbone pour décarboner le quotidien des Français, principalement dans les transports (29 % des émissions de CO<sub>2</sub>) et dans l'habitat.

Par ailleurs, la France porte une responsabilité particulière, en ce sens qu'elle dispose d'une position diplomatique forte sur les questions climatiques, et qu'elle est un grand pays nucléaire.

**À l'échelle internationale ensuite, la France doit :**

- Proposition 3 : Garantir la compétence industrielle nucléaire au niveau européen.
- Proposition 4 : S'engager pour que la technologie nucléaire soit reconnue pour les services qu'elle rend, et puisse jouer son rôle.

