

La transition énergétique en France part-elle dans la bonne direction ?

Nicolas MARCHAIS

École de technologie supérieure

Université du Québec

MARN06069904

nicolas.marchais.1@ens.etsmtl.ca

Montréal, le 11 juin 2022



Nicolas Marchais, 2022

RÉSUMÉ

Avec une prise de conscience collective de l'ensemble des problématiques liées aux changements climatiques, les citoyens s'attendent à ce que les gouvernements prennent des décisions afin d'assurer un avenir durable à l'ensemble de la population. L'un des enjeux principaux dans les sociétés actuelles est de réduire les émissions de gaz à effet de serre. En France, les solutions proposées par les décideurs français ont été rappelées à la population en 2015, lorsqu'il a été annoncé une nouvelle transition énergétique. Celle-ci favorise la croissance verte et a en son cœur un accroissement de l'efficacité énergétique et des énergies renouvelables (EnR) contre une diminution de l'énergie nucléaire. Une telle politique implique des coûts d'investissement très élevés, et il est bon de se demander si ces fonds sont utilisés pour la bonne cause. En effet, les centrales nucléaires françaises, bien qu'actuellement en mauvais état, sont aussi peu émettrices de carbone. La priorité étant de réduire les émissions de carbone à l'échelle du pays, est-ce que mettre la priorité sur les énergies n'est pas se tromper de combat ? Cette dissertation portera sur la nécessité de traiter la question énergétique d'un pays afin de réduire ses émissions. Elle présentera aussi les implications entraînées par l'utilisation du terme croissance verte. Finalement, elle discutera de si, oui ou non, la France est dans la bonne direction pour réduire ses émissions de gaz à effet de serre en présentant les corrections éventuelles à réaliser ainsi que les solutions possibles pour les secteurs en retard sur cette thématique.

Mots-clés: Transition énergétique, croissance verte, changement climatique, politiques publiques, mix énergétique

INTRODUCTION

Les premières inquiétudes relatives à l'effet de l'émission de CO₂ sur le climat sont apparues en 1824, lorsque Joseph Fourier publia son « Mémoire sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires ». Aujourd'hui, les enjeux climatiques et plus généralement environnementaux font de plus en plus fréquemment leurs apparitions dans les médias du globe. 6^e extinction et perte de biodiversité, nombre de catastrophes climatiques de plus en plus important, acidification des océans ... En bref, le climat est dérégulé et la faute revient entièrement à l'humanité et ses activités non pérennes. Bien que certains soient encore à convaincre du dérèglement climatique, le temps restant pour agir est de plus en plus restreint et il devient donc urgent de mettre en place des solutions permettant d'éviter la catastrophe, ou du moins permettant d'amortir le choc.

Avant toute chose, il convient de rappeler quels sont les objectifs en termes d'émissions de carbone en France. Le 8 novembre 2019 a été adoptée la loi énergie-climat qui inscrit l'objectif de carboneutralité de la France pour 2050 (Gouvernement Français, 2020). Afin de réaliser cet ambitieux objectif, les propositions suivantes ont été faites : réduction de 40% de la consommation d'énergies fossiles entre 2012 et 2030, arrêt de la production d'électricité du charbon d'ici 2022, installation obligatoire de panneaux solaires (ou autres énergies renouvelables ou végétalisation) sur les nouveaux bâtiments ou entrepôts commerciaux, lutter contre les passoires thermiques, réduire la dépendance de la France au nucléaire, et bien d'autres mesures (pour n'en citer que quelques-unes). Toutes ces propositions sont louables mais une question en émerge : pourquoi sont-elles toutes au même niveau de priorité ? Selon cette loi, réduire la dépendance au nucléaire de la France devrait être fait en parallèle d'une réduction de 40% de la consommation d'énergies fossiles : est-ce une bonne idée ? Est-ce techniquement possible ? C'est ce à quoi nous allons essayer de répondre à travers cette dissertation.

RÉPARTITION DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE PRIMAIRE EN FRANCE
TOTAL : 2 571 TWh en 2020 (données non corrigées des variations climatiques)
 En % (données non corrigées des variations climatiques)

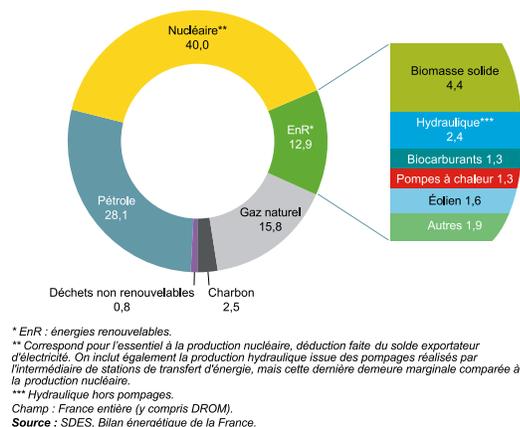


Figure 1 : Mix énergétique français en 2020 (Commissariat général au développement durable, 2021a)

En 2021, le mix énergétique français était constitué d'une majorité d'énergies non renouvelables (Figure 1) : le nucléaire en tête, suivi du pétrole puis du gaz naturel. Finalement, les énergies renouvelables ne représentaient que 12,9 % de la consommation d'énergie primaire en France, résultat extrêmement faible. De plus, d'après le ministère de la transition écologique français, la consommation finale brute d'énergies renouvelables était, en 2020, de 19,1 % contre l'objectif des 23 % fixé pour cette même année par la directive européenne 2009/28/CE (Commissariat général au développement durable, 2021c). Alors que pour certains, une telle nouvelle pourrait sembler catastrophique, il faut tout de même noter que 52,9% de la consommation d'énergie primaire en France est peu ou pas carbonée. De plus, malgré le retard notable dans le développement des énergies renouvelables, ces dernières ont le vent bien en poupe au nom de la croissance verte, à la suite de la réélection récente du président français Emmanuel Macron. En effet, lors de son récent discours en février 2022 à Belfort sur la politique énergétique de la France jusqu'en 2050, les énergies renouvelables étaient au cœur du débat. Mais celles-ci n'étaient pas les seules à être présentes dans la discussion, le projet énergétique de Macron s'articulant autour de plusieurs grands axes, dont notamment le nucléaire, contrairement à ses récents prédécesseurs et même la loi énergie-climat pourtant réalisée sous sa présidence. Il faut malgré tout garder en tête que près de 47,1% de l'énergie consommée provient de carburants fossiles fortement émetteurs de CO2 (Figure 1). Ce point est critique et une attention particulière devra y être portée si l'on veut pouvoir espérer diminuer les émissions françaises au plus vite.

Un tel discours s'inscrit dans ce qui est communément appelé « **croissance verte** », définie par l'organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) comme « promouvoir la croissance économique tout en s'assurant que les ressources naturelles et les services environnementaux nécessaires à notre bien-être perdurent » (OCDE, 2018). Entre autres, c'est permettre le développement des activités humaines tout en s'assurant que ces dernières ne rendent pas inhabitable la planète pour l'espèce humaine. Ce terme peut laisser place à la controverse étant donné qu'une telle définition est très anthropocentrée et ne laisse guère de place au développement des espèces autres que celle humaine. Ce terme et ses implications (entre optimisme et illusions) feront donc lui aussi l'objet d'une discussion au cours de cette dissertation.

Actuellement, le débat énergétique en France fait rage. Certains clament que le développement des énergies renouvelables est la voie à suivre, d'autres qu'il faut se tourner vers l'efficacité énergétique, d'autres encore prônent le nucléaire comme étant la meilleure solution ou bien que le futur se fera par l'électrification des transports et de l'industrie. On le constate rapidement lorsque l'on traite d'un tel sujet : la problématique est complexe et les solutions à envisager le sont tout autant. Et cette problématique est posée en omettant les personnes (forte heureusement de plus en plus rare) mettant en cause l'existence même du changement climatique ou l'implication de l'homme sur celui-ci. À travers cette dissertation, il sera passé en revue les différentes solutions, ou du moins voies à suivre, proposées par le gouvernement français, et une discussion de leur efficacité sur le long terme vis-à-vis des émissions en carbone sera réalisée.

PARTIE 1 : LE MIX ÉLECTRIQUE FRANÇAIS

Comme cela a été vu en introduction, près de 52,9% de l'énergie primaire consommée en France provient de sources d'énergie faiblement carbonées (énergies renouvelables associées à l'énergie nucléaire). Il est intéressant de remarquer que ces sources d'énergie sont, dans la grande majorité des cas, utilisées afin de produire de l'électricité.

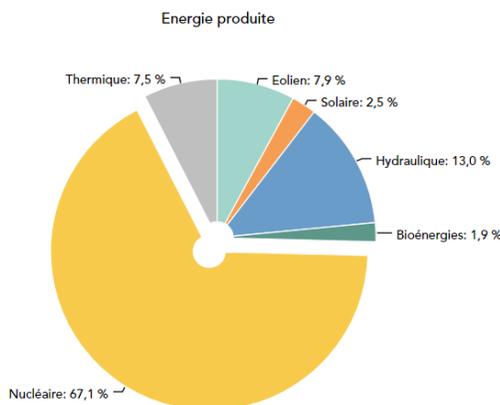


Figure 2 : Part de la production d'électricité par filière en France en 2020 (RTE, 2020b)

En effet, en ce qui concerne le mix électrique français, en 2020, la production est largement dominée par le nucléaire (67,1%, Figure 2). L'hydraulique, l'éolien et la thermique jouent aussi un rôle important (mais bien moindre, 28,4 %, Figure 2) en comparaison au nucléaire. Pour ce qui est des sources d'énergie restantes, elles ne jouent un rôle que dérisoire dans la production électrique vis-à-vis du nucléaire. Ainsi, on constate d'ores et déjà que la production électrique française est très dépendante de son parc nucléaire et que pour le reste, elle est très largement assurée par des énergies renouvelables. Ce premier bilan est prometteur, voire optimiste : les sources d'énergie évoquées ici sont considérées comme faiblement émettrices de gaz à effet de serre (GES) (que ce soit par leur construction, exploitation ou démantèlement). Il faut néanmoins garder à l'esprit que bien que « bas carbone » elles ne sont pas « vertes » dans le sens où leur construction ainsi que les déchets liés à leur exploitation peuvent être nocifs pour l'environnement. De plus, pour ce qui est des énergies renouvelables, la notion de bas carbone dépend fortement du site de production et de la manière dont est déployée la technologie (des éoliennes chinoises importées en France risquent fortement de perdre leur appellation basse carbone...). Cette problématique fera l'objet de discussion ultérieurement dans cette Partie 1.

À l'issue de cette première étude préliminaire de la production électrique en France, une première question peut déjà être soulevée : est-il nécessaire d'investir massivement dans les énergies renouvelables alors que la production d'électricité française est déjà majoritairement bas carbone ? Ne serait-il pas plus judicieux de placer cet argent dans des solutions à impact plus direct et ayant plus besoin d'investissement (tel que l'efficacité énergétique des bâtiments), du moins dans une phase de transition, avant de réinvestir dans les énergies renouvelables ?

PARTIE 2 : LES ÉNERGIES RENOUVELABLES FACE AU NUCLÉAIRE

Comme cela a été vu précédemment, le nucléaire assure en France 67,1% de la production d'électricité. Malgré des défauts environnementaux certains (notamment liés à la gestion des déchets (US Energy Information Administration, 2021)), le nucléaire reste aujourd'hui une solution peu carbonée et très sûre (Annexe A, Figure 6 et Figure 7). Aujourd'hui, le nucléaire reste donc la solution prioritaire quand l'on en vient aux questions de production électrique en France. Néanmoins, au cours de ces dernières années, la réticence liée à l'utilisation de cette technologie se fait de plus en plus forte. Cela a conduit le gouvernement français à intégrer dans la loi Énergie-Climat de 2019 un objectif de réduction de la dépendance de la production électrique en France : 50% de la production électrique française devra être assurée par du nucléaire (Gouvernement Français, 2020). Un tel objectif n'est pas sans conséquences : avec 17,1 % de production électrique assurée par le nucléaire en moins, il faudra trouver des sources d'énergies alternatives. Bien souvent, les solutions présentées sont les énergies renouvelables et en particulier le solaire et l'éolien qui affichent des prix de plus en plus compétitifs. Un problème majeur est alors souligné par ce remplacement : les centrales nucléaires sont dites « pilotables » c'est-à-dire que la production peut être modifiée à la demande de l'opérateur du réseau électrique, ce qui n'est pas le cas des énergies renouvelables. En effet, celle-ci sont dites « intermittentes » c'est-à-dire que leur production ne peut pas être contrôlée (à moins d'utiliser des technologies de stockage d'énergie) étant donnée qu'elle dépend de flux naturels dont la disponibilité n'est pas constante. Le problème ? La société actuelle est fondée sur un accès continu à l'énergie. Les énergies renouvelables ne sont donc pas bien dimensionnées pour subvenir aux besoins de celle-ci. Sur le long terme, ce ne sont pas les énergies renouvelables qui devront évoluer, mais la société qui devra revoir ses habitudes de consommations. Pour l'instant, la société n'en est pas là, et il faut donc assurer une transition la plus douce, en évitant du mieux que possible d'aboutir à un effondrement complet de la société (Meadows & Randers, 2004). Le nucléaire pourrait permettre de jouer ce rôle.

L'utilisation des énergies renouvelables semble être une alternative tout à fait cohérente d'un point de vue émissions de GES lorsque ces dernières viennent remplacer des centrales à charbon par exemple (Figure 6). Mais est-ce le cas lorsque ces dernières viennent remplacer des centrales de production d'électricité nucléaire ? À titre d'exemple, il va être étudié le cas des éoliennes étant donné que ces dernières sont au cœur de l'actualité énergétique française récente.

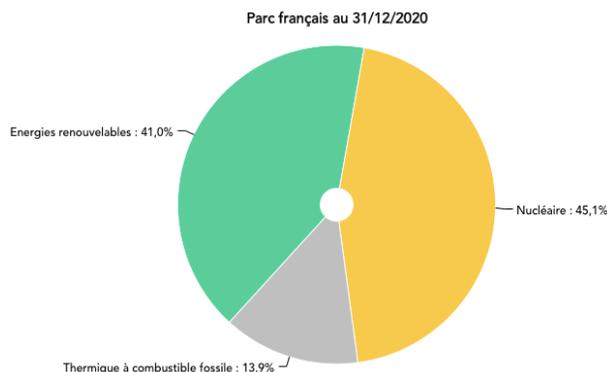


Figure 3 : Parc de production d'électricité en France le 31/12/2020 (RTE, 2020b)

La Figure 3 met en valeur l'un des problèmes majeurs lié à l'utilisation des énergies renouvelables : alors que les puissances installées en nucléaire et en énergies renouvelables sont quasiment identiques (45,1% contre 41%), le premier produit 67,1 % de l'électricité française tandis que l'autre n'en produit qu'environ 28,4% (valeur obtenue précédemment). Un tel résultat indique que la production d'électricité par des énergies renouvelables est moins rentable (financièrement, environnementalement et aussi probablement socialement) que par du nucléaire. D'après les chiffres de RTE, la filière nucléaire française a, en 2020, produit 335,4 TWh d'énergie avec ses 56 réacteurs répartis sur 18 centrales. D'autre part, les éoliennes ont produit en 2020 seulement 39,7 TWh. Il faudrait donc multiplier le parc éolien français actuel par 8,45 fois afin de produire autant d'énergie que le parc nucléaire français. En considérant que pour cette même année la puissance installée en éoliennes était de 17 616,1 MW, on en déduit un facteur de charge de 25,7 % (Équation 1). On émet ensuite l'hypothèse que les éoliennes françaises ont une puissance nominale de 2,5 MW ce qui permet d'obtenir environ 7000 éoliennes (Équation 2).

Équation 1 : Calcul du facteur d'utilisation du parc éolien français en 2020

$$FU = \frac{39.7e6 \text{ (MWh)}}{17616 \text{ (MW)} * 8760 \left(\frac{\text{heures}}{\text{année}}\right)} = 0.257 \quad (1)$$

Équation 2 : Calcul du nombre d'éoliennes dans le parc français en 2020

$$\text{Nombre d'éoliennes} = \frac{39.7e6}{2.5 * 0.257 * 8760} = 7036 \text{ éoliennes} \quad (2)$$

En reprenant la remarque précédente soulignant que **si l'on voulait entièrement remplacer le parc nucléaire par un parc éolien** il faudrait multiplier par 8.45 le parc actuel, **cela représenterait 59 442 soit environ 60 000 éoliennes !** Un tel nombre d'éoliennes est tout simplement faramineux. À titre d'exemple, il va être considéré que toutes ces éoliennes sont terrestres, la plupart des projets de parcs éoliens offshore ne sont pas encore terminés et ne sont donc pas comptés dans cette estimation. D'après le rapport de 2022 de REN21, le coût actualisé de l'éolien terrestre était, en 2021, de 33 USD/MWh (REN21, 2022). Les éoliennes considérées dans le calcul précédent ayant une puissance nominale de 2.5 MW, cela représenterait 1314 TWh. Ce résultat est bien plus élevé qu'attendu, car dans ce calcul, on ne considère que la puissance installée sans tenir compte du facteur de charge (si l'on tient compte de ce facteur, on retrouve les 335,4 TWh d'énergie produite par le parc nucléaire français). Si l'on convertit le résultat précédent en USD à l'aide du coût actualisé fourni par REN21, on obtient près de 43 milliards de dollars US soit **près de 41 milliards d'euros**. À titre de comparaison, la Cour des Comptes Française estime que le coût total des installations nécessaires à la production d'électricité nucléaire s'est élevé à 121 milliards d'euros (pour l'ensemble du parc nucléaire) (Cours des Comptes, 2012a). À première vue, il serait donc possible de construire 3 parcs éoliens produisant autant d'électricité que l'unique parc nucléaire français actuel. Bien sûr, il faut se rappeler que seulement 56 centrales nucléaires produisant toute cette énergie, contre 60 000 éoliennes éparpillées sur l'ensemble du territoire. Ces dernières nécessiteront donc un réaménagement gigantesque du réseau électrique français, ce qui fera exploser les coûts estimés précédemment. De plus, si l'on prend en compte que ce parc fonctionne depuis près de 50 ans, et qu'un parc éolien a en moyenne une durée de vie de 20 ans, le calcul devient encore moins rentable. Néanmoins, un tel argument serait hâtif, car, toujours d'après la Cours des Comptes, les charges d'exploitation annuelles du parc nucléaire français sont de 8,9 milliards d'euros en 2010. D'après Techniques de l'Ingénieur, les coûts de maintenance des éoliennes terrestres sont de l'ordre de 40 000 €/MW par an, soit avec la puissance installée en France en 2020, un coût total de 0,7 milliards d'euros (Techniques de l'Ingénieur, 2020). C'est bien plus faible que dans le cas du nucléaire. Néanmoins, il ne faut pas oublier qu'il serait nécessaire de multiplier le parc éolien actuel par 8.45 pour obtenir une production électrique aussi grande que celle des centrales nucléaires

actuelles. Cela représenterait donc un coût de maintenance annuel de 5,9 milliards d'euros pour les éoliennes terrestres. Et cette fois, cette valeur est bien plus proche des 8.9 milliards d'euros des coûts d'opérations et de maintenance du nucléaire.

Après cette première étude technico-économique rapide, il peut être intéressant de comparer les résultats obtenus avec ceux proposés par la Cours des Comptes française. D'après celle-ci, en 2016, la somme des dépenses publiques de soutien aux EnR était en France de 5,3 milliards d'euros et estimait que cette somme pourrait atteindre les 7.5 milliards d'euros d'ici 2023 (Cour des comptes, 2018). Toujours d'après la Cours des Comptes, il est estimé que le montant annuel en investissements et maintenance du parc nucléaire d'ici 2025 sera de 3,7 milliards d'euros (Cours des Comptes, 2012b). A priori, la tendance va vers un investissement plus important dans les EnR que dans le nucléaire. **En fait, si l'on considère l'ensemble des investissements qui vont être réalisés dans les EnR du fait des engagements pris jusque fin 2017, ces derniers représenteront 121 milliards d'euros entre 2018 et 2046 (date la plus tardive d'échéance des contrats)** (Cour des comptes, 2018). Rappelons que l'objectif fixé par la loi Énergie-Climat de 2019 est d'atteindre 50% de nucléaire dans le mix électrique français d'ici 2035. Ces deux chiffres soulèvent alors un sérieux problème : **la France va investir autant d'argent pour construire un parc d'EnR produisant 50% de l'électricité française que d'argent qu'elle avait investi dans un parc produisant encore aujourd'hui (longtemps après sa construction) 67,1% de son électricité.** Certes, un tel calcul omet les coûts de maintenance des deux, mais si l'on prend en compte les coûts liés au renouvellement plus rapide du parc d'EnR que du parc du nucléaire, ces deux valeurs se valent.

On le constate : remplacer un parc nucléaire par un parc éolien ne semble pas, a priori, être une catastrophe économique. **Les deux options sont discutables, mais envisageables.** Il faudra démanteler puis reconstruire les parcs éoliens à des fréquences plus importantes que pour celle du parc nucléaire, mais les coûts de maintenance sont aussi plus importants pour le second. Globalement, ces technologies semblent, financièrement, se valoir. De plus, ces deux solutions sont des sources d'électricité très bas carbone lorsqu'elles sont comparées aux autres sources d'électricité disponibles. **Néanmoins, il faut garder à l'esprit que l'espace occupé par une centrale nucléaire et un parc éolien de même énergie produite n'ont rien à voir.** Même si une telle solution semble envisageable d'un point de vue économique, réussir à placer 60 000 éoliennes en France ne semble pas être une mince affaire, surtout aux vus des problématiques de colère sociale que les 7000 déjà présentes engendrent (Lionel Steinman, 2021 ; MARTIN, 2021). Il faut aussi noter que sous investir dans le nucléaire diminue les investissements dans la sécurité des installations, ce qui pourrait aboutir à des conséquences dramatiques. Cela ne serait pas un problème si la baisse des investissements était suivie d'une diminution de la consommation électrique venant du nucléaire, mais cette diminution n'est que mineure, du fait de l'intermittence des EnR. En effet, comme expliqué précédemment, la société à un fonctionnement continu et non pas intermittent. Sur le long terme, un tel fonctionnement devra évoluer, mais pour l'instant il faut assurer une transition énergétique la plus douce possible afin d'éviter un effondrement sociétal.

De plus, à travers cette première analyse, exclusivement financière, plusieurs problématiques liées à l'utilisation des éoliennes ont été passées sous le tapis : non recyclage des pales (Journal de l'éolien, 2022 ; MARTIN, 2021), couplage des éoliennes avec des sources d'électricité non renouvelables afin de pallier à l'intermittence, etc. Pour ce qui concerne le deuxième problème cité, un exemple de l'actualité récente a fait scandale : la fermeture de la centrale nucléaire de Fessenheim. On peut en effet se demander si, fermer une telle centrale encore potentiellement fonctionnelle jusqu'en 2041, n'était pas une erreur et n'est pas une partie de la raison ayant poussé Emmanuel Macron à ne pas fermer la dernière centrale à charbon française ? Afin d'essayer de voir plus clair de l'impact de la fermeture des centrales nucléaires au profit de l'ouverture de parcs éoliens, une comparaison entre la France et l'Allemagne, ayant décidé de réaliser une telle transition énergétique, semble de mise.

PARTIE 3 : LE CONTRE EXEMPLE DE L'ALLEMAGNE

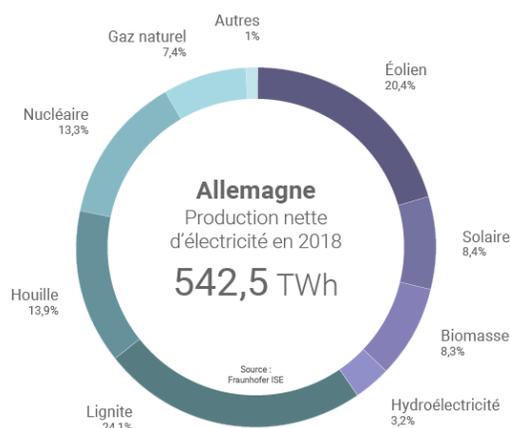


Figure 4 : La production électrique allemande a grandement reposé sur le lignite et l'éolien en 2018. (©Connaissance des Énergies d'après Fraunhofer ISE)

L'Allemagne arrive en 2022 à la conclusion d'un long processus de sortie du nucléaire. La Figure 4 présente le mix électrique allemand en 2018. Bien que l'éolien, le solaire, la biomasse et l'hydroélectricité représentent 40,3 % de la part de production, 38% de celle-ci est encore assurée par des combustibles fossiles hautement émetteurs de GES (houille et lignite). Le nucléaire ne représentait en 2018 déjà plus que 13,3 % de la production totale d'électricité Allemande. La question qui se pose ici est donc la suivante : l'Allemagne a remplacé ces centrales nucléaires par des EnR, est-ce que cela a augmenté ces émissions de CO2 ?

Contrairement à ce que certains pourraient croire, remplacer des centrales nucléaires par des parcs d'EnR n'a pas augmenté les émissions de CO2 de l'Allemagne. En effet, d'après l'IEA, entre 1990 et 2020, les émissions de GES de l'Allemagne sont passées de 940 MtCO2 à 644 MtCO2 (IEA, 2020b). Cela représente une réduction de 31,5 % des émissions de GES en 30 ans, alors que la consommation d'énergie finale a plutôt eu tendance à augmenter (527,41 TWh en 1990 à 535,64 TWh en 2020, (IEA, 2020b)). Un tel résultat est très encourageant, mais vient tout de même soulever une autre question : l'Allemagne est-elle exemplaire en termes d'émissions de CO2 à l'échelle européenne ?

Malheureusement, c'est ici un bilan plus sombre qui s'affiche. En effet, si l'on considère l'Union Européenne et ses 28 états membres qui émettent 2994 MtCO2 en 2019 (IEA, 2020a) alors l'Allemagne et ses 644 MtCO2 émit en 2019 représente 21.5 % des émissions de CO2 de l'Union Européenne. Un tel résultat est affligeant, mais à tempérer. Il faut en effet garder en tête que l'Allemagne est le cœur industriel de l'Europe. Néanmoins, cela reste bien trop élevé. Et une telle contribution en émissions de CO2 est due à une mauvaise gestion de ses transports et industries : 149 MtCO2 équivalents pour le premier et 181 MtCO2 équivalents pour le second. De plus, malgré la forte part de production EnR dans le mix électrique allemand, sa production énergétique représente 240 MtCO2 équivalents...

Globalement, l'Allemagne a réussi à diminuer ses émissions de CO2 au long de ces 30 dernières années. Malgré tout, remplacer les centrales nucléaires par des parcs de production EnR est une décision discutable lorsque l'on sait que ces mêmes parcs auraient pu servir à remplacer des centrales thermiques fonctionnant au charbon et qui elles, sont toujours en activité en 2022. De plus, du fait de la récente crise diplomatique en Ukraine, l'Allemagne fait face à un manque de ressource en gaz naturel, ressource sur laquelle elle repose énormément pour produire de l'énergie finale de consommation. Cette disponibilité limitée a forcé l'Allemagne à rouvrir des centrales au charbon dans l'actualité récente ce qui est aussi contraire aux objectifs climatiques de l'accord de Paris (AFP, 2022).

Finalement, la décision de l'Allemagne de sortir du nucléaire à l'aide des énergies renouvelables est tout à fait louable, mais dans le cadre d'urgence climatique actuelle, une telle décision est discutable. Choisir de décarboner en priorité les secteurs les plus carbonés tout en conservant des centrales nucléaires faiblement carbonées et en remplaçant des centrales de production d'électricité ou d'énergie finale de consommation par des parcs d'EnR aurait peut-être été plus judicieux.

PARTIE 4 : QUELLES CONCLUSIONS INTERMÉDIAIRES TIRER ?

Comme cela a pu être vu lors des parties précédentes, il est tout à fait possible d'un point de vue technique et économique de remplacer des centrales nucléaires par des parcs éoliens (ou tout autre type d'EnR). Néanmoins, du fait de l'intermittence de cette technologie, il ne faut surtout pas supprimer l'intégralité du parc nucléaire, car cela conduirait à un fort déséquilibre dans la

production d'électricité comme ce qui a été vu en Allemagne. Dans un contexte d'urgence climatique, fermer un grand nombre de parcs nucléaires au profit de l'ouverture de parc EnR risquerait d'entraîner (du fait du type de fonctionnement actuel de la société), une augmentation de l'utilisation de centrales à charbon (du moins dans le contexte actuel de pénurie de gaz naturel) et donc d'émissions de GES. Un tel résultat serait contre-productif vis-à-vis du changement climatique.

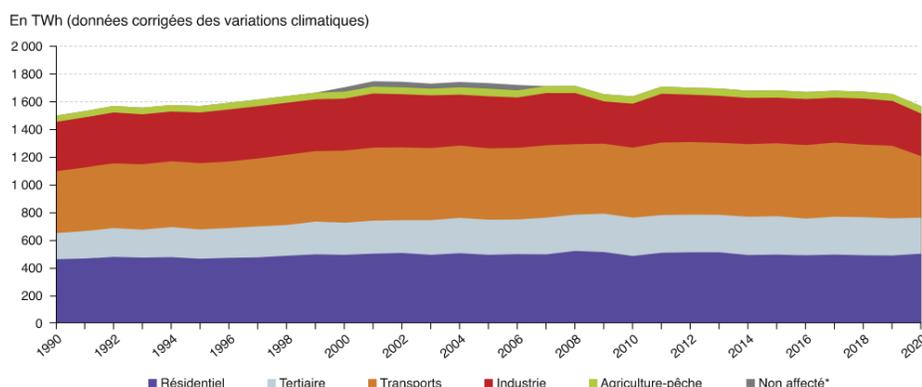
En effet, il est bon de rappeler que l'objectif actuel de la France est d'atteindre la carboneutralité d'ici 2050. Or la plupart des objectifs français consistent à remodeler le parc de production électrique de la France ! Alors même que ce dernier est décarboné à près de 95,5% ! Un tel mix énergétique en termes de production électrique semble déjà tout à fait louable au regard de l'environnement et de la sécurité : la plupart des centrales nucléaires peuvent encore fonctionner pour une longue durée, moyennant des coûts de maintenance importants (Connaissance des énergies, 2020). Ainsi, concernant la production d'électricité en France, intégrer des EnR est une très bonne idée, soutenue par les propositions du GIEC (IPCC, 2022). Néanmoins, afin de s'assurer que la production d'électricité reste décarbonée, il faudra aussi conserver un nombre conséquent de centrales nucléaires, rénover celles à rénover, démanteler celles à démanteler et construire de nouveaux réacteurs en remplacement, toujours selon les recommandations du GIEC (IPCC, 2022).

On ne peut que se poser des questions quant à la logique derrière la décision de fermer prématurément des centrales nucléaires encore parfaitement fonctionnelles, décarbonées et qui vont dans le sens des recommandations du GIEC. Malheureusement, il existe bien une logique derrière ce raisonnement, mais celle-ci n'a rien à voir avec des principes environnementaux, il faut plutôt regarder du côté financier. Comme cela a pu être vu en partie 2, construire des parcs éoliens ou solaires coûte très cher. En soi, la différence avec les coûts cumulés des centrales nucléaires n'est pas si grande, donc une telle option semble à la rigueur envisageable. Fermer prématurément les centrales nucléaires évoquées précédemment force le gouvernement français à trouver des alternatives de production d'électricité : EnR et combustibles fossiles. Et ces investissements ravissent les entreprises spécialisées en développement EnR...

Faut-il alors comprendre de cette partie que les EnR sont à éviter ? Non, certainement pas. Les EnR, tout comme le nucléaire, font partie de la solution. Et tout comme le nucléaire, ces technologies présentent elles aussi des défauts. Néanmoins, au regard de l'environnement et des émissions de GES, elles représentent le moindre mal. Ce qu'il faut retenir de ces premières parties est qu'investir massivement dans un renouvellement d'un parc de production d'électricité décarboné alors que cet argent pourrait être mis dans des solutions décarbonant réellement l'économie française est une décision plus que discutable. Rappelons en effet 47,1 % de l'énergie primaire consommée en France provient de combustibles fossiles alors que 95,5% de la production d'électricité est décarboné. Le combat n'est pas à mener, pour l'instant dans la production d'électricité, mais dans les autres secteurs de consommations d'énergie en France. Le renouvellement des centrales nucléaires et le déploiement de milliers d'éoliennes ne sont pas une urgence (bien que des investissements de maintenance et d'exploitation soit eux, nécessaire), contrairement à la réduction des émissions de GES françaises.

PARTIE 5 : QUELLES ALTERNATIVES ENVISAGEABLES ?

Afin de trouver des alternatives, il ne faut donc plus regarder comment produire une énergie plus propre (car dans tous les cas la production d'énergie sera, d'une manière ou d'une autre, polluante), mais comment ne pas consommer d'énergie. Et pour cela, il faut regarder quels secteurs, en France, sont les plus consommateurs d'énergie.



* La répartition de la chaleur par secteur consommateur n'est pas disponible entre 2000 et 2006.

Champ : jusqu'à l'année 2010 incluse, le périmètre géographique est la France métropolitaine. À partir de 2011, il inclut en outre les cinq DROM.

Source : calculs SDES

Figure 5 : Consommation finale énergétique par secteur en France, (Commissariat général au développement durable, 2022a)

À l'aide de la Figure 5, il peut être remarqué que les trois secteurs les plus gros consommateurs d'énergie en France en 2020 sont, dans l'ordre décroissant de consommation, le résidentiel (450,2 TWh), les transports (444,6 TWh), l'industrie (hors hauts-fourneaux, 301,6 TWh) et le tertiaire (243,5 TWh) (Commissariat général au développement durable, 2022a). À l'inverse, la production d'électricité n'est responsable que de 4,8% des émissions de CO₂ (RTE, 2020a). Ces valeurs indiquent que la priorité est donc à mettre sur les transports et le résidentiel. Diminuer la consommation d'énergie de ces secteurs permettra de diminuer les émissions de GES liés à la production de cette énergie en question.

Ainsi, si l'on se concentre sur les deux secteurs consommant le plus d'énergie en France soit le résidentiel et les transports, on constate que :

- 1- Pour le résidentiel, la consommation finale énergétique provenant de combustibles fossiles (produits pétroliers, gaz naturel ou charbon) représente 38,9% des 450,2 TWh d'énergie consommée (Commissariat général au développement durable, 2022b).
- 2- Pour les transports, la consommation finale énergétique provenant de produits pétroliers ou de gaz représente 91,2 % des 444,6 TWh d'énergie consommée (Commissariat général au développement durable, 2022c).

Ces valeurs sont très élevées, notamment pour les transports, et soulignent que ces secteurs devraient faire partie des priorités énergétiques françaises : électrifier les transports et améliorer l'efficacité thermique des bâtiments sont des solutions envisageables et sont d'ailleurs recommandées par le GIEC (IPCC, 2022).

Commençons par rappeler que l'investissement total entre 2018 et 2046 dans les EnR est de 121 milliards d'euros. Que peut-on faire avec une telle somme si l'on fait l'hypothèse que l'intégralité de cet argent sera utilisée exclusivement afin de réduire les émissions de GES de la France (et qu'il n'est pas nécessaire d'investir dans les énergies, ni en maintenance, ni en renouvellement des parcs de production). Cette hypothèse est bien évidemment fautive, mais elle permet d'avoir grossièrement une idée des directions envisageables par la France.

Parmi les cibles d'investissements possible pour cette somme d'argent par la France, il y a :

- 1- **Les chauffages au fioul.** D'après l'INSEE, en 2018, il y avait en France, 2.9 millions de résidences principales chauffées au fioul en France (INSEE, 2021). Si l'on considère un chauffage électrique standard d'une puissance de 1000W que l'on peut trouver sur Amazon, le prix moyen est environ de 100 euros (Amazon, 2022). De plus, ces chauffages électriques peuvent être directement branchés sur une prise électrique donc ne nécessitant pas de coût d'installation. Ainsi, si l'on décidait d'installer 10 de ces chauffages électriques dans chacun des 2,9 millions de résidences chauffées au fioul, cela coûterait 2.9 milliards d'euros. Un tel résultat est bien dérisoire comparé aux 121 milliards d'euros investis dans les EnR. Et pourtant, la réduction d'émissions de GES entraînées est, elle, bien plus importante.

On émet l'hypothèse que les résidences chauffées au fioul étaient toutes chauffées par des centrales fioul-vapeur et qu'à la suite de l'installation des 10 chauffages électriques par résidences, ces dernières sont chauffées par des kWh provenant de centrales nucléaires. Cette hypothèse est fautive, mais permet d'obtenir un ordre de grandeur des réductions d'émissions de CO₂. En effet, lorsque l'on compare les émissions de GES liés à la combustion de fioul ou à la production d'électricité de carburant nucléaire, les émissions de GES du second sont négligeables vis-à-vis du premier : pour 1 kWh d'énergie produite, une centrale nucléaire émet 6 g de CO₂, une centrale fioul-vapeur en émet 730 (Économie d'énergie, 2012).

- 2- **Les transports en commun.** Un problème majeur auquel font face la plupart des tissus urbains français est le manque de transports en commun développés. Les mairies veulent limiter l'utilisation des voitures dans le centre des villes, mais les réseaux de transports en commun sont en retard. Considérons le coût des derniers bus électriques achetés par la RATP en 2018 : 500 000 euros par bus (Lionel Steinman, 2021). En théorie, avec 1/3 des 121 milliards d'euros de financement pour les EnR, on pourrait donc acheter près de 81 000 bus électriques. Évidemment, ce calcul ne tient pas compte des coûts de maintenance et d'exploitation de ces bus, mais étant donné que ce calcul n'a considéré qu'un tiers des 121 milliards d'euros disponibles, il resterait des finances pour faire tourner ces bus. À titre d'exemple, il y avait en 2021, 2006 bus dans la flotte de bus de Montréal, ville de près de 4 millions d'habitants (STM, 2021). Sachant qu'il y avait en France, 65 284 389 habitants d'après l'INSEE (INSEE, 2022b), et en émettant l'hypothèse que doubler la flotte de bus de Montréal permettrait de supprimer les véhicules individuels (voitures essences et diesels), 64 000 bus seraient nécessaires pour assurer un transport fluide sur l'ensemble de la France. Un tel chiffre est imposant : 1000 bus pour 1 million d'habitants soit 1 bus pour 1000 habitants (sachant que les plus jeunes et les plus âgés ont moins besoin de transports longues distances). Une telle flotte permettrait d'étendre le réseau de transports des villes afin d'accéder aux zones rurales les plus éloignées tout en fluidifiant le réseau déjà existant. Cela représente 32 milliards d'euros en reprenant les calculs précédents. Il serait donc en théorie possible, avec des hypothèses très fortes ne tenant pas compte de l'acceptation sociale, des limitations techniques (bornes de recharge) et de construction (assez de lithium ?) des bus électriques, de remplacer les voitures responsables de 94% de la consommation d'énergie du secteur des transports (Commissariat général au développement durable, 2022c). Si l'on considère que parmi la flotte de véhicules du transport routier français, seuls les véhicules lourds transportant les marchandises ne sont pas remplacés par une telle mesure, cela permet tout

de même de diminuer les émissions de CO₂ du transport routier par près de 94,1 millions de tonnes de CO₂ (en omettant les émissions de CO₂ nécessaire à la production d'électricité faisant avancer les bus électriques ici étudiés). Sachant que la France émet environ 268 millions de tonnes de CO₂ (cf conclusion), une telle économie représente 35,1 % des émissions de GES françaises. Évidemment, cette solution n'est pas parfaite et nécessiterait des solutions complémentaires en parallèle afin d'être viable socialement, économiquement et environnementalement (1 bus pour 1000 habitants serait certainement un peu juste). Cela permet néanmoins d'obtenir un ordre de grandeur et une idée de la marche à suivre en termes d'investissements afin de réduire les émissions de CO₂ françaises.

Après ces deux brefs exemples, on remarque que l'impact de telle mesure vis-à-vis des émissions de CO₂ en France est bien plus important que le remplacement de centrales nucléaires par des éoliennes. Alors finalement, quelles conclusions tirer de cette dissertation ?

PARTIE 6 : MIEUX CONSOMMER OU NE PAS CONSOMMER ?

Un monde 100% renouvelable est possible, mais avec une quantité astronomique d'agriculteurs et une société moyenâgeuse. Avec notre société actuelle, ce n'est pas possible. Est-ce que celle-ci est pour autant durable ? Non plus on le sait à cause du principe sur lequel elle repose : la croissance. Quoi faire alors ? Une nouvelle révolution sociétale, qui fonctionnera, à terme, uniquement avec des énergies renouvelables et aura une consommation raisonnée (et sobre) d'énergie. Pour atteindre une telle société, les solutions de transitions ici proposées sont le couplage d'EnR avec des centrales nucléaires. Mais à terme, ce n'est pas les EnR qui ne devront ne plus être intermittentes, mais la société qui devra probablement le devenir.

Par ailleurs, un oubli majeur dans la loi Énergie-Climat de 2019 et pourtant la seule solution viable et durable est la sobriété énergétique. C'est l'une des solutions principales proposées par de nombreux experts (association NégaWatts par exemple) pour répondre à la problématique environnementale sans précédente auquel l'humanité fait actuellement face et pourtant, ce terme n'est pas présent une seule fois dans la loi en question. Pourquoi un tel oubli ? Très certainement à cause d'un objectif sous-jacent à cette loi, la « croissance verte ». En effet, encore aujourd'hui, la quasi-totalité des gouvernements utilise le Produit Intérieur Brut (PIB) ainsi que sa croissance comme facteur de bien-être pour le pays gouverné. Le problème ? Le PIB est un indicateur qui a été conçu purement pour répondre à des problématiques économiques, mais qui est totalement inadéquat face à des questions écologiques ou sociétales (Guilhaudis & Fontanel, 2019). Il ne faudrait donc surtout pas privilégier la croissance d'un tel indicateur dans une optique de développement durable, d'où la contradiction interne du terme « croissance verte ». Mais dans ce cas, que faire ?

Il existe un vaste panel de solution et d'alternatives à considérer. Tout d'abord, il est d'une importance capitale de se débarrasser du PIB afin de prendre des décisions gouvernementales éclairées, et pas uniquement concentrées sur l'économie, qui ne reflète ni le bonheur citoyen ni le bon état environnemental du territoire. Utiliser d'autres indicateurs, tels que l'indice de progrès véritable serait un bon début d'action (Gignac, 2011). Ce dernier mesure le bien-être économique d'un pays en prenant en compte environnement et aspect social, ce qui est totalement omis par le PIB.

Une autre voie à suivre et déjà évoquée précédemment est la sobriété énergétique. Ce terme a en partie été conceptualisé par l'association négaWatt et peut être appliqué d'un très grand nombre de manières. Par exemple, rouler à 110 km/h au lieu de 130 km/h permet d'économiser 25% de carburant (et ainsi nécessairement d'émettre moins de CO₂) pour un même trajet de 100 km (Association négaWatt, 2022). Un autre exemple de sobriété énergétique serait de construire une maison selon le label Passivhaus, puisque celle-ci aura une consommation énergétique très basse, bien plus que la moyenne française. Un autre courant d'action, rejoignant la sobriété énergétique, est celui de la low-tech. La low-tech est un terme s'appliquant à tout ce qui intègre la technologie de manière utile, accessible et durable. Cela s'applique donc autant à des toilettes sèches qu'à un chauffe-eau solaire (Low-tech Lab, 2022).

Comme cela a pu être vu au sein de cette partie, les solutions pour agir mieux et plus rapidement que les actions actuellement prises sont nombreuses. Elles ne sont pas basées sur un objectif de rendement économique positif, mais bien sur un rendement écologique positif, et c'est peut-être malheureusement ce qui manque encore trop dans les décisions et lois gouvernementales françaises.

CONCLUSION

À l'issue de cette longue analyse de la structure énergétique française, plusieurs points clés ressortent : investir massivement dans les énergies renouvelables en ayant pour objectif moyen terme une cohabitation entre nucléaires et EnR est une bonne idée, voire nécessaire (l'Allemagne en a payé les frais). La mauvaise idée, a priori, est de le faire trop tôt, alors que la plupart des centrales nucléaires françaises fonctionnent encore très bien. Pourquoi est-ce une mauvaise idée ? Parce que l'argent utilisé pour financer les projets EnR pourrait être utilisé dans des projets entraînant une réduction de l'émission de GES de la France de manière plus rapide et directe. Ces de ce genre de mesures dont la France et le reste du monde ont besoin face à l'urgence climatique toujours plus pressante (période de canicule en France alors que l'été n'est même pas encore arrivé (France24, 2022)).

La loi Énergie-Climat de 2019 a déjà mis l'accent sur de telles mesures, mais elle a aussi éparpillé l'action. Investissements dans les EnR, réduction de la dépendance au nucléaire et combat contre les passoires thermiques, tous ces objectifs sont louables, mais l'ordre des priorités proposé par la loi est peut-être à revisiter. L'échec de la France à sortir du charbon en 2022 est l'un des marqueurs d'une potentielle fausse route (La Tribune, 2021)... Malgré tout, il reste difficile de tirer un bilan des impacts de cette loi, puisque la période Covid-19 a drastiquement diminué les émissions de CO2 de l'ensemble des pays du globe, sans que cela ait pour autant eu quoi que ce soit à voir avec un changement des habitudes de consommations. Seul l'avenir dira si cette loi a finalement une raison ou bien s'il aurait fallu prendre une direction différente.

L'année 2020 a été une année « record » en termes d'émissions de carbone, dans le sens positif du terme, puisqu'il y a eu une baisse de 1,9 Gt d'émissions de CO2 dans le monde par rapport à 2019 (IEA, 2021). Malgré tout, c'est bien cette année-là qui va être considérée dans les calculs suivant puisque cette étude ne veut qu'obtenir un ordre de grandeur : la proportion des émissions de CO2 françaises vis-à-vis de celles du reste du monde.

D'une part, d'après l'Agence Internationale de l'Énergie (IEA), les émissions de CO2 en 2020 ont été de 31,5 Gt (IEA, 2021). D'autre part, d'après le Ministère de la Transition Écologique française, un habitant de la France Métropolitaine émettait 4.1 tonnes de CO2 en 2020 (Commissariat général au développement durable, 2021b). Finalement, d'après l'Institut National de la Statistique et des Études Économiques (INSEE), il y avait 65 284 389 habitants en France en 2020 (INSEE, 2022b). On en déduit par un calcul simple que la France émettait donc 268 Mt de CO2 en 2020. Un tel résultat semble plutôt cohérent et est relativement proche de celui du Global Carbon Atlas qui estimait que la France émettait 277 Mt de CO2 en 2020 (Global Carbon Atlas, 2020). Il est à noter que cette valeur ne prend en compte que les émissions de carbone sur le territoire de la France métropolitaine et pas celles dues aux activités de la France en dehors de son territoire (dans ce cas-là, la France émet 395,7 millions de tonnes d'équivalent de CO2 (INSEE, 2022a).

À l'issue de la démarche précédente, il peut donc être déduit que la France émettait 0,85 % des émissions totales mondiales en CO2 (1,26% si l'on considère les activités de la France à l'intérieur et à l'extérieur du territoire métropolitain). Ainsi, même dans un scénario idéal où la France deviendrait par miracle carboneutre en 2022, cela serait loin d'être suffisant pour limiter les émissions de CO2 dans l'atmosphère, et ne résoudrait donc pas la problématique abordée au cours de cette dissertation sur le long terme.

En effet, il convient de rappeler que l'inertie thermique des phénomènes environnementaux entraînera une augmentation de la température globale de la planète, même si les activités humaines stoppaient dès aujourd'hui.

Pour conclure, et cela ne sera jamais assez répété : il est capital d'agir rapidement. Les actions ne peuvent plus être retardées plus longtemps et il est désormais urgent d'agir. C'est d'ailleurs ce qui a été fortement souligné dans le 3^e volet du 6^e rapport du GIEC concernant le changement climatique (GIEC, 2022). Par ailleurs, comme cela a été démontré plus haut, **notre salut à tous ne pourra se passer d'une coopération majeure à l'échelle mondiale**, sans quoi les répercussions sur le climat, l'environnement et plus généralement notre mode de vie seront pour toujours irréversibles.

RÉFÉRENCES

1. AFP. (2022, 15 mars). Allemagne: les émissions de CO2 repartent à la hausse en 2021. *Le Monde de l'Énergie*. Repéré à <https://www.lemondedelenergie.com/allemanne-co2-2021/2022/03/15/>
2. Amazon. (2022). Vente de radiateurs électriques sur Amazon. Repéré à https://www.amazon.fr/s?k=radiateurs+electriques&adgrpid=1360096820172347&hvadid=85006515117982&hvbmt=bp&hvdev=c&hvllocphy=5433&hvnw=s&hvqmt=p&hvtargid=kwd-85006576930275%3Aloc-32&hydadcr=15746_2293810&tag=hydfirmsn-21&ref=pd_sl_49mymotyyn_p
3. Association négaWatt. (2022). La sobriété énergétique. *Association négaWatt*. Repéré à <https://negawatt.org/La-sobriete-energetique>
4. Commissariat général au développement durable. (2021a). Bilan énergétique de la France. *Chiffres clés de l'énergie - Édition 2021*. Repéré à <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-energie-2021/6-bilan-energetique-de-la-france.php>
5. Commissariat général au développement durable. (2021b). Émissions de CO2. *Chiffres clés de l'énergie - Édition 2021*. Repéré à <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-energie-2021/9-emissions-de-co2.php>
6. Commissariat général au développement durable. (2021c). Objectifs 2020 et situation actuelle de la France | Chiffres clés des énergies renouvelables. *Chiffres clés des énergies renouvelables - Édition 2021*. Repéré à <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-energies-renouvelables-2021/3-objectifs-2020-et-situation-actuelle-de-la-france.php>
7. Commissariat général au développement durable. (2022a, janvier). 5.1 Consommation finale d'énergie : forte baisse. *Bilan énergétique de la France pour 2020*. Repéré à <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/bilan-energetique-2020/25-51-consommation-finale-denergie--forte-baisse-.php>
8. Commissariat général au développement durable. (2022b, janvier). 5.3 Résidentiel : hausse de la consommation à climat constant. *Bilan énergétique de la France pour 2020*. Repéré à <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/bilan-energetique-2020/27-53-residentiel--hausse-de-la-consommation-a-climat-constant.php>
9. Commissariat général au développement durable. (2022c, janvier). 5.5 Transports : une consommation au plus bas depuis la fin des années 1980. *Bilan énergétique de la France pour 2020*. Repéré à <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/bilan-energetique-2020/29-55-transports--une-consommation-au-plus-bas-depuis-la-fin-des-annees-1980.php>
10. Connaissance des énergies. (2020, 1 juillet). Parc nucléaire français : nombre de réacteurs, localisation, chiffres clés. Repéré à <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/parc-nucleaire-francais>
11. Cour des comptes. (2018, 18 avril). Le soutien aux énergies renouvelables | Cour des comptes. Repéré à <https://www.ccomptes.fr/fr/publications/le-soutien-aux-energies-renouvelables>
12. Cours des Comptes. (2012a, janvier). Documents | Cour des comptes. Repéré à <https://www.ccomptes.fr/fr/documents/1137>
13. Cours des Comptes. (2012b, janvier). Les coûts de la filière électronucléaire. Repéré à <https://www.ccomptes.fr/fr/documents/1137>
14. Desjardins, J. (2018, 10 mai). The Safest Source of Energy Will Surprise You. *Elements by Visual Capitalist*. Repéré à <https://elements.visualcapitalist.com/worlds-safest-source-energy/>
15. Économie d'énergie. (2012, 24 septembre). Les émissions de CO2 par énergie. *Économie d'énergie*. Repéré à <https://www.economiedenergie.fr/les-emissions-de-co2-par-energie/>
16. France24. (2022, 18 juin). La canicule s'amplifie en France, records de température attendus. *France 24*. Repéré à <https://www.france24.com/fr/france/20220618-an>
17. GIEC. (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Repéré à <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>
18. Gignac, R. (2011). Mesurer le progrès social: vers des alternatives au PIB, 22.
19. Global Carbon Atlas. (2020). Welcome to Carbon Atlas | Global Carbon Atlas. Repéré à <http://www.globalcarbonatlas.org/en/content/welcome-carbon-atlas>
20. Gouvernement Français. (2020, 16 janvier). Loi énergie-climat. *Ministères Écologie Énergie Territoires*. Repéré à <https://www.ecologie.gouv.fr/loi-energie-climat>
21. Guilhaudis, J.-F., & Fontanel, J. (2019). Les effets « pervers » de l'usage du PIB pour la décision politique et les relations internationales. *Annuaire français de relations internationales, XX*. Repéré à <https://hal.univ-grenoble-alpes.fr/hal-02197761>
22. IEA. (2020a). Data & Statistics. *IEA*. Repéré à <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-browser>
23. IEA. (2020b). Germany - Countries & Regions. *IEA*. Repéré à <https://www.iea.org/countries/germany>
24. IEA. (2021). CO2 emissions – Global Energy Review 2021 – Analysis. *IEA*. Repéré à <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2021/co2-emissions>
25. INSEE. (2021, 30 juin). 50 ans d'évolution des résidences principales : des logements plus grands et moins peuplés - Insee Première - 1865. Repéré à <https://www.insee.fr/fr/statistiques/5400123>

26. INSEE. (2022a). Émissions de gaz à effet de serre par activité | Insee. Repéré à <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2015759#tableau-figure1>
27. INSEE. (2022b). Population au 1er janvier | Insee. Repéré à <https://www.insee.fr/fr/statistiques/5225246#tableau-figure1>
28. IPCC. (2014). AR5 Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change — IPCC. Repéré à <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/>
29. IPCC. (2022). AR6 Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change — IPCC. Repéré à <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-3/>
30. Journal de l'éolien. (2022). Le recyclage des pales éoliennes. *Journal de l'éolien - Tout sur l'éolien*. Repéré à <https://www.journal-eolien.org/tout-sur-l-eolien/le-recyclage-des-pales-eoliennes/>
31. La Tribune. (2021, 9 juillet). La France ne sortira finalement pas du charbon en 2022 : la reconversion de la centrale EDF de Cordemais est abandonnée. *La Tribune*. Repéré à <https://www.latribune.fr/entreprises-finance/industrie/energie-environnement/la-france-ne-sortira-finalement-pas-du-charbon-en-2022-888636.html>
32. Lionel Steinman. (2021, 14 juin). Eoliennes : les nouvelles raisons de la colère. *Les Echos*. Repéré à <https://www.lesechos.fr/idees-debats/edits-analyses/eoliennes-les-nouvelles-raisons-de-la-colere-1323331>
33. Low-tech Lab. (2022). Low-tech Lab – Les Low-tech : l'innovation utile, accessible et durable. Repéré à <https://lowtechlab.org/fr/la-low-tech>
34. MARTIN, J. (2021). Les éoliennes dans le vent mauvais de la colère. *Mediapart*. Repéré à <https://blogs.mediapart.fr/jean-clément-martin/blog/290621/les-eoliennes-dans-le-vent-mauvais-de-la-colere>
35. Meadows, D., & Randers, J. (2004). *The Limits to Growth: The 30-year Update*. London : Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781849775861>
36. OCDE. (2018). Qu'est-ce que la croissance verte et comment peut-elle aider à assurer un développement durable ? - OCDE. Repéré à <https://www.oecd.org/fr/croissanceverte/quest-cequelacroissanceverteetcommentpeut-elleaideraassurerundevveloppementdurable.htm>
37. REN21. (2022). Renewables Global Status Report. *REN21*. Repéré à <https://www.ren21.net/reports/global-status-report/>
38. RTE. (2020a). Production – Emissions de CO2 : RTE Bilan électrique 2020. Repéré à <https://bilan-electrique-2020.rte-france.com/production-emissions-de-co2/>
39. RTE. (2020b). Production – Production totale : RTE Bilan électrique 2020. Repéré à <https://bilan-electrique-2020.rte-france.com/production-production-totale/>
40. STM. (2021). Rapport annuel 2021. *Société de transport de Montréal*. Repéré à <https://www.stm.info/fr/a-propos/informations-entreprise-et-financieres/rapport-annuel-2021>
41. Techniques de l'Ingénieur. (2020). Quels sont les coûts de l'éolien et du solaire ? *Techniques de l'Ingénieur*. Repéré à <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/quels-sont-les-couts-de-leolien-et-du-solaire-86713/>
42. US Energy Information Administration. (2021). Nuclear power and the environment - U.S. Energy Information Administration (EIA). Repéré à <https://www.eia.gov/energyexplained/nuclear/nuclear-power-and-the-environment.php>

ANNEXES

ANNEXE A

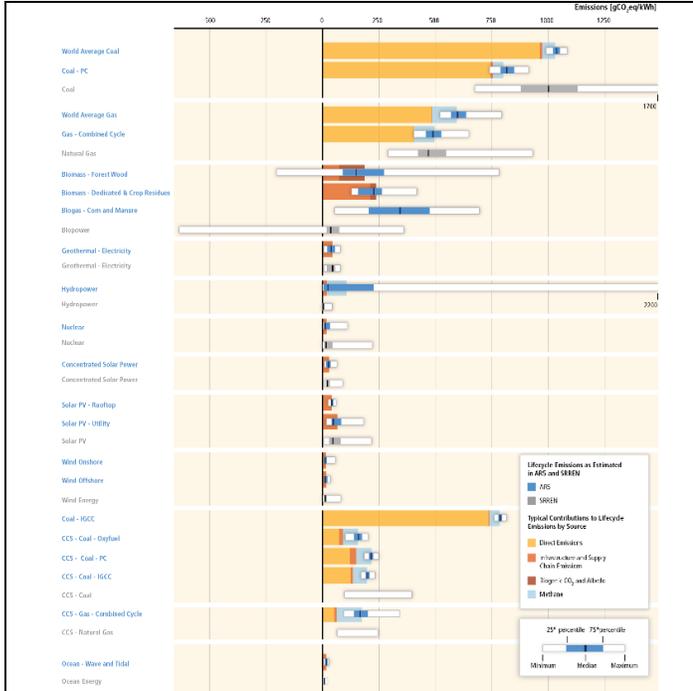


Figure 6 : Comparaison des émissions de gaz à effet de serre sur le cycle de vie de l'électricité fournie par différentes technologies de production d'électricité, (IPCC, 2014)

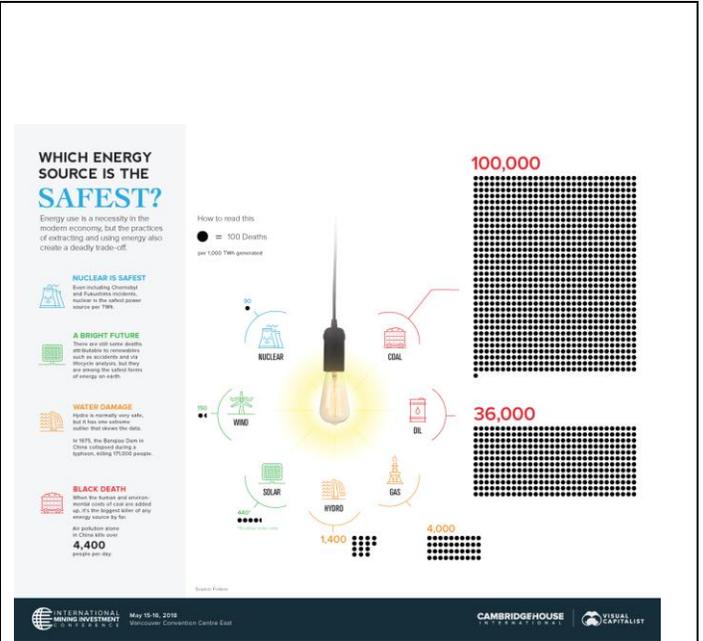


Figure 7 : Quelle source d'énergie est la plus sûre ? (Desjardins, 2018)