

PRENDRE LA RAISON PAR LE BON BOUT !

APPLICATION À LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE

SOMMAIRE

Plaidoyer pour un changement de paradigme 7

Comme de raison

- Propagation du virus écologique 13
- Sources d'électricité intermittentes 15
- La Nature ne connait pas les pourcentages 17
- Utilisation des voitures électriques 18
- Empreinte carbone et service rendu 21
- Comparaison France - Allemagne 23

Dix leçons à méditer 27

Annexes

Ordres de grandeur

- Puissance et énergie 37
- Production d'électricité en France 37
- Consommation d'énergie en France 40
- Émissions de gaz à effet de serre 41

Fiches techniques

- Sources d'électricité à fort taux d'émission de gaz à effet de serre 49
- Sources d'électricité à faible taux d'émission de gaz à effet de serre 50
- La filière hydrogène 55
- Batteries 57

PLAIDOYER POUR UN CHANGEMENT DE PARADIGME

La prise de conscience par les scientifiques de la nécessité de limiter nos émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère terrestre remonte à plus de trente ans. Le premier rapport du Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) date en effet de 1990. Sa traduction la plus remarquée au niveau de l'expression politique remonte quant-à-elle à l'année 2002 avec le discours de Jacques Chirac - président de la République Française à cette époque - à l'assemblée plénière du quatrième sommet de la Terre: « *Notre maison brûle et nous regardons ailleurs* ».

Constat

Depuis ces dates, de nombreuses actions sont bien entendu menées à tous les niveaux pour alerter sur l'urgence de la situation. Elles n'ont cependant pas abouti à une réelle transformation pérenne de nos pratiques quotidiennes pour limiter au strict minimum nos émissions de gaz à effet de serre. Il a fallu attendre les évènements inhabituels que l'on a connu en France, et dans le monde entier, à l'été 2022 - sécheresse et rationnement de l'eau, feux de forêt, tempêtes - pour voir l'ébauche d'une première prise de conscience collective se mettre en place. Et cette prise de conscience reste particulièrement fragile, que ce soit en France ou dans le monde.

Comment faire pour que celle-ci se traduise en actes à grande échelle, à la fois dans l'espace et dans le temps ? Jusqu'à présent, une multitude d'actions ponctuelles existent sur tout le territoire français, depuis très longtemps parfois. Celles-ci se développent cependant sans grande cohérence entre elles, et n'arrivent pas à agréger autour d'elles tout un réseau de nouvelles actions pérennes. On ne peut s'empêcher de penser, à la vue de ce constat, aux caractéristiques typiques de la propagation d'un virus par les voies respiratoires: il faut absolument qu'un « *virus écologique* » puisse se développer en France sur l'ensemble de notre territoire !

Le virus écologique, ou *éco-virus*, dont nous parlons ici est véhiculé par toutes les actions que l'on peut entreprendre au niveau du simple citoyen, des collectivités territoriales ou de l'état, et qui ont pour objet la réduction des émissions de gaz à effet de serre dans différents domaines - production d'électricité, logement, transports, industrie.

La transition entre un régime d'actions ponctuelles et déconnectées les unes des autres à un régime d'actions cohérentes réparti sur tout le territoire correspond à ce que l'on appelle dans le langage scientifique *une transition de percolation*. On peut ainsi rester très longtemps dans le premier régime sans même jamais atteindre le second, et donc sans jamais pouvoir avoir des actions cohérentes de transformation de nos pratiques quotidiennes et qui soient fortes, généralisées sur tout le territoire et pérennes. Par contre, le passage à ce second régime est extrêmement brusque à la condition, pour y parvenir, d'ouvrir le plus de chemins possibles, et dans des directions variées.

Si ce type d'approche est évidemment purement heuristique, il constitue un cadre d'analyse tout à fait nouveau. Il permet en particulier d'identifier les conditions pour arriver à une véritable transformation pérenne de nos pratiques quotidiennes.

Comment faire ?

La stratégie qui en découle est basée sur une ligne directrice simple, et quatre principes élémentaires.

Une ligne directrice simple

La propagation d'un virus à grande échelle est d'autant plus facile et rapide que les chemins qu'il peut emprunter sont nombreux et variés. Il faut donc toujours veiller à ouvrir des chemins plutôt que d'en fermer, avec des interlocuteurs variés - citoyens, collectivités territoriales et état.

Chaque acteur de notre société devrait ainsi pouvoir ouvrir des chemins divers, adaptés à son domaine de compétence et à ses capacités financières, et non pas se trouver face à une porte fermée qu'il n'a souvent pas les moyens d'ouvrir.

Quatre principes élémentaires

Le premier de ces principes concerne le service rendu par chacune de nos actions. Toutes nos habitudes de consommation répondent à des besoins spécifiques - *un service rendu* - dans tous les domaines de la vie courante. Dans une société largement ouverte sur le monde entier, changer de façon autoritaire l'offre que peut proposer un pays sans s'occuper de la conséquence sur le service rendu n'a au mieux aucun effet, au pire peut provoquer des blocages particulièrement pénalisants, et donc fermer des chemins.

Les actions de réduction de nos émissions de gaz à effet de serre doivent aussi s'inscrire dans la durée. Ce sera notre deuxième principe. Une large partie du dioxyde de carbone - environ 40% - émis par les activités humaines est encore présente dans l'atmosphère plus de cent ans après son émission, alors que le méthane est entièrement détruit après environ une cinquantaine d'année. Il est donc essentiel que toutes ces actions puissent être ancrées dans la durée. Il est tout aussi indispensable qu'elles reposent sur des mécanismes économiques eux aussi ancrés dans la durée. Sans quoi ces actions s'arrêteront d'elles-mêmes, et là encore des chemins se fermeront.

Pour la même raison, ces actions doivent déborder largement du cadre imposé par le temps

politique, rythmé par l'élection présidentielle tous les cinq ans. C'est notre troisième principe. Ces actions doivent donc être mises en œuvre dans un cadre essentiellement a-politique. N'oublions pas que l'écologie est une science, au même titre que la physique ou la chimie, et donc parfaitement a-politique. Cela ne veut pas dire, bien au contraire, que les partis politiques n'ont pas un rôle à jouer dans ce domaine. Mais ce rôle doit toujours s'inscrire dans la recherche d'un consensus purement pragmatique et non pas idéologique pour avoir une chance de perdurer au delà du temps politique. Là encore pour pouvoir ouvrir de nouveaux chemins pérennes.

Enfin, notre quatrième principe consiste à identifier les vrais bonnes priorités, ou en d'autres termes à *regarder la raison par le bon bout* ! Cela est essentiel - compte tenu de la situation financière dégradée de la France - pour ne perdre ni de temps ni d'argent. La France a cependant un atout majeur en Europe, qu'elle partage seulement avec la Suède: sa production d'électricité est décarbonée à 95%, avec une production abondante qui se traduit actuellement par une exportation de plus de 20% de sa production. Toutes les actions dans le domaine de la réduction de nos émissions de gaz à effet de serre doivent pouvoir profiter de cet atout.

Avec quels acteurs ?

Pour ne pas fermer inutilement des chemins, chaque acteur de la société doit avoir un rôle propre. Quel sont ces acteurs et avec quels interlocuteurs ?

Les acteurs

Les différents niveaux d'organisation de la société sont tous indispensables pour que l'*éco-virus* puisse se propager à grande distance. Rien ne sert de rejeter la responsabilité de l'inaction sur l'échelon supérieur ou inférieur. Cela ne sert qu'à fermer des chemins.

Le premier rôle de l'*état* est bien évidemment d'assurer l'alimentation en énergie de l'ensemble des activités du pays. Les enjeux dans ce domaine sont énormes, notamment pour anticiper les évolutions de notre consommation dans le futur. La transition actuelle que nous vivons entre une utilisation massive de produits pétroliers ou gaziers, vers une utilisation massive d'électricité décarbonée est à la fois un atout majeur pour la France et un défi industriel qu'il convient de mener avec sang froid et pragmatisme, pour ouvrir un chemin clair et inscrit dans le long voir le très long terme.

La France bénéficie d'un ensemble continu de *collectivités territoriales*, chacune avec ses compétences propres. Si cela peut paraître un atout pour mener à bien des projets d'ampleur de plus en plus grands tout en restant au plus près des préoccupations des citoyens, cette organisation induit aussi des contraintes très fortes. En effet, la transformation de nos pratiques quotidiennes nécessite des compétences variées, souvent portées par des collectivités territoriales différentes. Il faut donc impérativement que ces collectivités travaillent ensemble, pour ouvrir un chemin la aussi clair et inscrit dans la durée. Rien ne sert d'ouvrir un chemin si il est bouché un peu plus loin.

Enfin, on ne peut pas demander au *citoyen* des actions qu'il n'a pas les moyens de faire, non seulement par manque de moyens financiers mais aussi parce qu'elles impactent trop le service rendu. Cela revient alors à fermer des chemins, parfois définitivement. Chacun doit pouvoir agir selon sa situation familiale, sociale et financière. Pour cela, le partage d'expérience est essentiel, d'où le rôle primordial d'un certain nombre d'interlocuteurs, scientifiques, médias, ou partis politiques.

Les interlocuteurs

Les alertes des *scientifiques* sont connus depuis le premier rapport du Giec. Et nous savons maintenant que la température moyenne sur terre, et plus particulièrement encore en Europe, va continuer d'augmenter pendant de nombreuses années, tout simplement parce que la concentration de dioxyde de carbone dans l'atmosphère va continuer à augmenter pendant de nombreuses années. Dans ces conditions, la priorité pour les scientifiques n'est sans doute plus d'alerter, mais de trouver, en concertation avec les différents échelons de la société, des solutions pérennes et originales pour transformer nos pratiques, pour ouvrir de nouveaux chemins. Tout cela dans une approche pluridisciplinaire indispensable. Il est toujours plus efficace d'avoir des messages positifs plutôt qu'anxiogènes pour entrainer les citoyens sur de nouveaux chemins.

Chaque jour, chaque semaine, chaque mois nous avons sur de nombreux *médias* maintes informations sur l'évolution de la température ou de la pluviométrie en France. Et évidemment, il fait toujours plus chaud, ou il pleut toujours plus - ou toujours moins - et les événements extrêmes sont toujours plus fréquents. Tous ces constats sont connus et participent tous à fermer des chemins, par découragement et démotivation des uns et des autres. Nous devrions plutôt avoir à la place des gros plans sur toutes les actions positives mises en œuvre dans chaque territoire, de la plus petite commune à la plus grande région. Cela demande évidemment un peu plus de réflexion et de travail de recherche et ne se trouve pas dans les dépêches de l'AFP. Cela est cependant indispensable pour là encore ouvrir de nouveaux chemins.

Les *partis politiques* sont présents à tous les échelons de la société, à l'assemblée nationale et au sénat jusqu'au conseil municipal de chaque commune. Ils sont donc aussi au cœur des préoccupations des

français. Au delà des différences de sensibilité, ils doivent être une source non seulement de propositions mais surtout d'actions concrètes sur le terrain, en co-construction avec tous les acteurs de la vie sociale et économique du territoire sur lequel ils sont implantés. Cela nécessite bien sûr une coordination certaine avec les différents niveaux d'organisation de la société. A quoi sert évidemment d'ouvrir un chemin si un peu plus loin il est bouché.

La situation particulière de la France

La production actuelle d'électricité en France est structurée autour de deux piliers: une alimentation de base en continu assurée par les centrales nucléaires et les centrales hydrauliques, et une alimentation complémentaire intermittente assurée par les parcs d'éoliennes et de panneaux photovoltaïques. L'alimentation de base est en particulier indispensable pour assurer l'approvisionnement en électricité d'un pays lors des nuits d'été, en l'absence de vent soutenu. Le surplus de production d'électricité en France est exporté vers nos pays voisins.

Cette situation est un atout majeur pour réduire nos émissions de dioxyde de carbone et arriver à une neutralité carbone en 2050, comme prévu par l'Union Européenne. Le remplacement rapide de moteurs thermiques par des moteurs électriques, que ce soit dans les voitures, bus, camions ou trains TER, participe ainsi directement à la réduction de ces émissions en France.

C'est aussi le cas de la production d'*hydrogène dit « vert »* par électrolyse de l'eau, à partir d'électricité décarbonée. Cette production a l'énorme avantage de pouvoir s'adapter au caractère intermittent de la production d'électricité par les parcs d'éoliennes ou de panneaux photovoltaïques. Cela permet ainsi d'utiliser pleinement l'électricité produite par ces parcs, tout en optimisant le fonctionnement des centrales nucléaires et sans avoir besoin d'exporter le surplus d'électricité produite en France.

Qu'en est-il par contre dans de nombreux pays Européens, et en particulier en Allemagne ? L'alimentation de base en électricité est actuellement en Allemagne tributaire des centrales à charbon, particulièrement émettrices de dioxyde de carbone. Toute consommation nouvelle d'électricité, comme par exemple par le développement des voitures électriques ou la production d'hydrogène vert, ne fera alors qu'induire un fonctionnement accru de ces centrales, avec donc un bilan en terme d'émissions de dioxyde de carbone quasiment nul. Et le développement important de parcs d'éoliennes ou de panneaux photovoltaïques ne changera rien à l'affaire tant que l'alimentation de base de ce pays sera tributaire de centrales à charbon !

En effet, si l'électricité de ces parcs est utilisée, même partiellement, pour produire de l'hydrogène ou charger les batteries des voitures électriques, elle ne pourra plus servir de complément à l'alimentation de base par les centrales à charbon. Il faudra alors augmenter la production de ces centrales, avec ainsi un surplus d'émissions de dioxyde de carbone. Ce que l'on a gagné d'un coté, on le perd de l'autre !

Cette situation en Allemagne - et plus généralement dans tous les pays Européens encore tributaires de centrales à charbon pour leur alimentation de base en électricité - doit impérativement être intégrée dans toute politique globale de réduction des émissions de dioxyde de carbone en Europe.

La France n'est en effet pas isolée du reste du continent Européen. Les grandes masses d'air froides et chaudes en Europe - et avec elles toutes les émissions de dioxyde de carbone - évoluent indépendamment des frontières physiques entre pays. Il est donc illusoire de penser que les efforts que les Français peuvent faire pour réduire leurs émissions de dioxyde de carbone va avoir un effet prépondérant sur l'évolution *globale* de la température en Europe, tant que la part de la production d'électricité par les centrales à charbon dans plusieurs pays Européens sera importante. Elle est par exemple de 20% actuellement en Allemagne et de 50% en Pologne .

Ces efforts sont par contre évidemment essentiels pour réduire *localement* la pollution de l'air par le remplacement progressif des moteurs thermiques par des moteurs électriques et la production à grande échelle d'hydrogène vert. Cette production à grande échelle est une condition nécessaire pour arriver à une neutralité carbone en 2050, par remplacement des centrales à charbon et au gaz en Europe par des centrales à hydrogène par exemple. Le développement à grande échelle d'une filière hydrogène complètement décarbonée est l'un des atouts majeur de la France qu'il convient de développer avec constance et beaucoup d'ambitions dans les années à venir, au même titre que le développement de centrales nucléaires de nouvelle génération.

La suite de ce document reprend l'argumentation de cette introduction, en la développant.

COMME DE RAISON

« La raison a deux bouts: le bon et le mauvais. Il n'y en a qu'un sur lequel vous puissiez vous appuyer avec solidité, c'est le bon ! On le reconnait à ce que rien ne peut le faire craquer, ce bout là, quoi que vous fassiez ! quoi que vous disiez ! »

Rouletabille dans « Le mystère de la chambre jaune » de Gaston Leroux

La transformation de nos pratiques quotidiennes, indispensable pour accélérer la transition écologique, doit impérativement s'ancrer dans la durée. Pour cela, il convient de prendre les nombreux problèmes qui se posent à nous par *« le bon bout de la raison »*. En voici quelques exemples dans le domaine de l'énergie.

Propagation du virus écologique

Sources d'électricité intermittentes

La Nature ne connait pas les pourcentages

Utilisation des voitures électriques

Empreinte carbone et service rendu

Comparaison France - Allemagne



Propagation du virus écologique

La prise de conscience par les scientifiques de la nécessité de limiter nos émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère terrestre remonte à plus de trente ans. Le premier rapport du Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) date en effet de 1990. Sa traduction la plus remarquée au niveau de l'expression politique remonte quant-à-elle à l'année 2002 avec le discours de Jacques Chirac - président de la République Française à cette époque - à l'assemblée plénière du quatrième sommet de la Terre: « *Notre maison brûle et nous regardons ailleurs* ».

Qu'est-ce qu'un virus écologique ?

Depuis ces dates, de nombreuses actions sont bien entendu menées à tous les niveaux pour alerter sur l'urgence de la situation. Elles n'ont cependant pas abouti à une réelle transformation pérenne de nos pratiques quotidiennes pour limiter au strict minimum nos émissions de gaz à effet de serre. Il a fallu attendre les évènements inhabituels que l'on a connu en France, et dans le monde entier, à l'été 2022 - sécheresse et rationnement de l'eau, feux de forêt, tempêtes - pour voir l'ébauche d'une première prise de conscience collective se mettre en place. Et cette prise de conscience reste particulièrement fragile, que ce soit en France ou dans le monde.

Comment faire pour que celle-ci se traduise en actes à grande échelle, à la fois dans l'espace et dans le temps ? Jusqu'à présent, une multitude d'actions ponctuelles existent sur tout le territoire français, depuis très longtemps parfois. Celles-ci se développent cependant sans grande cohérence entre elles, et n'arrivent pas à agréger autour d'elles tout un réseau de nouvelles actions pérennes. On ne peut s'empêcher de penser, à la vue de ce constat, aux caractéristiques typiques de la propagation d'un virus par les voies respiratoires: il faut absolument qu'un « *virus écologique* » puisse se développer en France sur l'ensemble de notre territoire !

Le virus écologique, ou *éco-virus,* dont nous parlons ici est véhiculé par toutes les actions que l'on peut entreprendre au niveau du simple citoyen, des collectivités territoriales ou de l'état, et qui ont pour objet la réduction des émissions de gaz à effet de serre dans différents domaines - production d'électricité, logement, transports, industrie.

Si ce type d'approche est évidemment purement heuristique, il constitue un cadre d'analyse tout à fait nouveau. Il permet en particulier d'identifier les conditions pour arriver à une véritable transformation pérenne de nos pratiques quotidiennes.

Caractéristiques de la propagation d'un virus par les voies respiratoires

L'exemple le plus récent de propagation d'un virus par les voies respiratoires est donné par la propagation du virus SARS-CoV-2 qui a donné lieu à l'épidémie de COVID-19 dans le monde. Quelles sont les caractéristiques d'un tel virus ?

Ce virus se propage à l'occasion des relations sociales que l'on peut avoir dans le domaine familial, de la vie courante ou professionnelle. Celles-ci peuvent être plus ou moins importantes, avec un premier cercle de relations essentielles, et un deuxième cercle de relations moins essentielles. Cette propagation dépend non seulement de la virulence du virus, mais aussi de la sociologie du territoire dans lequel il se propage, et des gestes barrières que l'on peut mettre en œuvre. Cette sociologie se traduit par exemple par la plus ou moins grande habitude de se faire la bise en dehors du cercle purement familial. Les gestes barrières sont évidemment liés au port du masque.

La contamination par une personne infectée pourra se faire pendant un temps limité propre à chaque virus. Une fois contaminée, et guérie, une personne sera alors immunisée naturellement. Cette immunité peut aussi s'acquérir par la vaccination de la population. Cela va ainsi ralentir la propagation du virus, ou même la bloquer si la proportion de personnes vaccinées est suffisamment grande. Ce virus peut ensuite avoir, lors de la propagation d'une personne à une autre, des mutations. Il va alors donner lieu à des variants aux caractéristiques épidémiologiques différentes.

La propagation du virus commence toujours par une période de propagation invisible, avec une propagation limitée au milieu familial, de la vie courante ou professionnel et une dissémination très lente sur tout le territoire. Comment va alors évoluer cette propagation dormante ? Elle peut soit s'éteindre d'elle même si par exemple le virus n'est pas suffisamment virulent, si la population est déjà suffisamment vaccinée, ou encore si les gestes barrières sont opérationnels. Dans le cas contraire, elle va pouvoir se propager à grande distance, et ce d'autant plus vite qu'il y a des évènements - dits super-propageants - qui vont permettre au virus de ce propager à plus grande échelle. Ce sont par exemple des rassemblements familiaux ou festifs, des manifestations sportives ou encore religieuses.

Comment propager un virus écologique à grande échelle ?

Tout a été mis en œuvre lors de l'épidémie de COVID-19 pour éviter la propagation fulgurante du virus à très grande échelle: gestes barrières, périodes de confinement, mise en place de la vaccination. Tout au contraire, il faut bien évidemment, pour ce qui concerne l'*éco-virus*, mettre en œuvre toutes les actions qui vont permettre à ce virus de se propager sur un vaste territoire et très rapidement. Comment peut-on le faire ?

Nous pouvons trouver très naturellement une analogie point par point avec les caractéristiques de propagation d'un virus par les voies respiratoires que nous avons rappelées ci-dessus:

- L'*éco-virus* doit se propager dans différents domaines - logement, nourriture, transports, industrie - avec chaque fois des caractéristiques et des contraintes propres. *Cela va ainsi correspondre à différents variants de l'éco-virus*.
- Pour avoir le plus de chances de se propager à grande distance sur un territoire donné, il doit pouvoir être véhiculé dans le plus de directions possibles. Cela correspond aux initiatives de différents acteurs: citoyens, associations, collectivités territoriales et état. *Ces initiatives doivent donc être opérationnelles en même temps.*
- La propagation de cet *éco-virus* se fait par relations entre interlocuteurs qui peuvent être soit déjà convaincus (cercle de relations essentielles) ou simplement ouverts au dialogue (cercle de relations moins essentielles). *Il faut augmenter au maximum le nombre de ces interlocuteurs.*
- Chaque variant va être plus ou moins facile à propager. Cela va correspondre à la plus ou moins grande facilité de mise en œuvre des actions, selon leur coût financier et humain ou leur durée de mise en œuvre par exemple. Il est par exemple souvent plus facile de transformer nos pratiques quotidiennes dans le domaine de la nourriture plutôt que dans celui des transports. *Plus ces actions sont faciles à mettre en œuvre, plus le variant sera dit virulent.*
- La plus ou moins grande facilité de propagation de l'*éco-virus* va dépendre de plusieurs conditions comme par exemple la capacité financière de chaque acteur ou le soutien financier extérieur, le pouvoir de conviction des acteurs ou le retour sur investissement plus ou moins rapide. *Il faut augmenter au maximum cette facilité.*
- Il existe encore malheureusement des interlocuteurs climatosceptiques. Ces interlocuteurs sont ainsi vaccinés contre toute propagation de l'*éco-virus*. Cela peut aussi correspondre à des interlocuteurs ayant eu une mauvaise expérience ou encore des interlocuteurs bien trop culpabilisés et donc incapables d'avoir une action positive. *Il faut bien évidemment minimiser au maximum le nombre de ces personnes vaccinées.*
- La propagation de l'*éco-virus* va être "boostée" par des évènements super-propageants comme par exemple des expériences très réussies localement, ou impliquant un grand nombre de personnes avec un fort pouvoir de conviction. *Il faut multiplier au maximum ces actions et surtout leur donner une très large publicité médiatique.*

L'expérience acquise lors de l'épidémie de COVID-19 nous a montré que le passage entre un régime d'actions ponctuelles et déconnectées les unes des autres à un régime d'actions cohérentes et réparties sur tout le territoire est extrêmement brusque. On parle alors dans le langage scientifique de *transition de percolation*[1]. On peut ainsi rester très longtemps dans le premier régime sans même jamais atteindre le second, et donc sans jamais pouvoir avoir des actions cohérentes de transformation de nos pratiques quotidiennes et qui soient fortes, généralisées sur tout le territoire et pérennes. Par contre, le passage à ce second régime est extrêmement brusque, à condition évidemment d'ouvrir le plus de chemins possibles pour y parvenir.

Si ce type d'approche est évidemment à ce stade purement heuristique, il constitue un cadre d'analyse tout à fait nouveau. Il permet en particulier de comprendre quelles pourraient être les conditions pour arriver à une neutralité carbone[2] le plus rapidement possible, alors que nous avons été incapables de le faire depuis une trentaine d'année. Et ce n'est pas faute d'alertes de la part des scientifiques et des associations de défense de l'environnement.

[1] voir le site internet: refletsdelaphysique.fr/articles/refdp/abs/2022/03/refdp202273p22/refdp202273p22.html
[2] voir page 22



Sources d'électricité intermittentes

L'électricité produite par les parcs d'éoliennes ou de panneaux photovoltaïques est actuellement injectée dans le réseau national ou utilisée en auto-consommation. Est-ce vraiment la meilleure utilisation de ces énergies renouvelables pour réduire nos émissions de gaz à effet de serre ? Pour répondre à cette question, il convient de cerner très précisément l'utilisation que l'on veut en faire. Dire: *"une éolienne permet d'alimenter en électricité une ville de 2000 habitants"* ne suffit pas. Que faire en période d'absence de vent ? Est-ce qu'une solution appropriée pour un pays l'est aussi pour un autre ?

Toute utilisation rationnelle de ces sources d'énergie renouvelable devrait plutôt se faire selon un principe physique simple: adapter la consommation d'électricité de l'utilisateur final à la nature intermittente de ces sources.

Échelles caractéristiques de temps

Les sources de production d'électricité ne fonctionnent en effet pas toutes de la même manière en ce qui concerne la durée pendant laquelle elles peuvent effectivement en produire. Les éoliennes ou les panneaux photovoltaïques ne fonctionnent que lorsqu'il y a suffisamment de vent ou de lumière ! Cette évidence saute aux yeux quand on l'écrit, elle n'est pourtant pas toujours considérée à sa juste valeur.

Les centrales hydrauliques, les centrales thermiques à gaz et les centrales nucléaires peuvent quant-à-elles produire de l'électricité en continu. Elles sont aussi plus ou moins facilement pilotables, c'est-à-dire que l'on peut moduler, à la demande, leur production d'électricité. Les centrales thermiques à gaz et les centrales hydrauliques peuvent le faire très rapidement. La modulation de la production des centrales nucléaires ne peut se faire par contre qu'à une échelle de temps bien plus grande afin d'assurer leur fonctionnement de façon optimale et en toute sécurité.

Situation actuelle en France

Afin de garantir une production d'électricité suffisante pour alimenter un pays comme la France, et garantir en même temps un minimum d'indépendance vis-à-vis des pays étrangers, on doit impérativement se projeter loin dans l'avenir. Pour ce faire, et compte tenu des nombreuses incertitudes à la fois d'ordre climatiques mais aussi géopolitiques inhérentes à ce genre d'exercice, il est indispensable de se référer à des principes simples.

La situation actuelle en France est de ce point de vue pour le moins paradoxale. L'électricité produite par les sources d'énergie renouvelable est injectée directement dans le réseau national pour être utilisée en complément de l'alimentation de base par les centrales nucléaires. Cette alimentation de base est aussi modulée pour tenir compte des évolutions prévisibles de la consommation selon les saisons, entre le week-end et les autres jours de la semaine, ou encore en raison de la variation prévisible de la consommation intra-journalière. Toute variation sur des échelles de temps courtes, et donc non prévisibles, de la production d'électricité par les sources intermittentes d'énergie renouvelable doit alors être compensée par les centrales hydrauliques ou les centrales thermiques à gaz. Elles seules en effet peuvent le faire de façon très rapide. Elle peut aussi être compensée si besoin par l'importation d'électricité de pays voisins.

La mise en œuvre de parcs d'éoliennes et de panneaux photovoltaïques implique donc, en France, un fonctionnement non optimal des centrales nucléaires. La puissance injectée dans le réseau de ces centrales doit en effet s'adapter à la production moyenne d'électricité de ces sources intermittentes que l'on peut anticiper selon les prévisions météorologiques et l'alternance jour-nuit. Elle induit aussi inévitablement l'utilisation de centrales thermiques à gaz, ou de centrales hydrauliques, pour faire face aux fluctuations rapides de la production d'électricité suite aux variations momentanées de vent ou de soleil sur le territoire français. Leur installation ne permet ainsi en rien de réduire autant qu'elle le devrait l'émission de gaz à effet de serre

par les centrales thermiques à gaz. Elle pourrait même l'augmenter par la nécessité d'utiliser ces centrales pour faire face à ces fluctuations rapides, en complément des centrales hydrauliques.

Un scénario alternatif

Pour avoir une utilisation rationnelle des sources d'énergie renouvelable, la consommation de l'électricité produite par les parcs d'éoliennes ou de panneaux photovoltaïques doit plutôt pouvoir s'adapter à la nature intermittente de leur production. Compte-tenu de la prévision ambitieuse d'installation des sources d'énergie renouvelable dans les années à venir, il convient de leur trouver une utilisation de même ampleur et aussi délocalisée dans l'espace que l'est l'installation de ces parcs.

Il est rassurant de voir qu'une telle utilisation existe et se développe déjà ces dernières années, notamment en France: il s'agit de la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau[1]. Cet hydrogène est appelé « hydrogène vert ». On peut par ailleurs le stocker pour s'adapter très simplement à l'intermittence des sources d'énergie renouvelable. Il est ensuite utilisé comme combustible, avec l'oxygène de l'air, dans des piles à combustible pour produire de l'électricité en rejetant simplement de l'eau. Des trains TER et des bus circulent d'ores et déjà avec de telles piles couplées à un moteur électrique. On peut même voir des voitures particulières fonctionnant à l'hydrogène. Certains constructeurs en propose déjà à leur catalogue.

On arrive ainsi à un scénario particulièrement naturel au fur et à mesure du développement des technologies à hydrogène et de l'installation de nouveaux parcs d'éoliennes et de panneaux photovoltaïques. La mise en service progressive de trains TER fonctionnant avec une pile à combustible permet le développement de centres de production et de stockage d'hydrogène sur une grande partie du territoire Français. Cela permet ainsi d'envisager à court terme aussi la mise en service de nouveaux bus urbains fonctionnant à l'hydrogène, en profitant de l'expérience acquise et des installations déjà mises en œuvre. Avec la réduction des coûts prévisibles pour l'installation de centres de production d'hydrogène, à une échelle d'une dizaine d'année typiquement, il sera alors réaliste d'envisager le développement à plus grande échelle de bus, camions, voir voitures électriques fonctionnant à l'hydrogène.

Ce scénario a de nombreux avantages :

- il permet de ne plus avoir besoin d'utiliser les centrales thermiques à gaz, émettrices de gaz à effet de serre, pour faire face à la modulation rapide de la puissance électrique injectée dans le réseau liée à l'intermittence des énergies renouvelables;
- il permet au contraire de réduire l'émission de gaz à effet de serre dans les transports, domaine particulièrement émetteur de gaz à effet de serre, essentiellement du dioxyde de carbone;
- il permet aussi d'utiliser à son maximum la puissance installée des parcs d'éoliennes ainsi que des centrales nucléaires, par une parfaite adéquation entre production et consommation, à la fois dans l'espace et dans le temps.

La situation à l'étranger

Il est intéressant de comparer à ce sujet la situation de la France à celle de l'Allemagne[2]. La production de base en électricité est essentiellement assurée en Allemagne par les centrales thermiques à gaz et au charbon, avec une production nulle des centrales nucléaires. Toute production, même intermittente, des sources d'énergie renouvelable permet ainsi de limiter d'autant l'utilisation des centrales thermiques au charbon particulièrement émettrices de gaz à effet de serre. Elle a alors un réel impact sur la quantité de dioxyde de carbone émis, contrairement à ce qui se passe en France.

La situation actuelle - tant du point de vue du changement climatique que géopolitique - nous impose de trouver des solutions novatrices qui doivent s'inscrire dans la durée. Il est indispensable dans ce cadre de s'appuyer sur des scénarios simples et rationnels. Celui proposé ici en est un exemple concret.

[1] voir page 53
[2] voir page 23



La Nature ne connait pas les pourcentages

Les données pullulent sur internet, parfois avec une précision de trois chiffres significatifs ou même plus. Ce qui veut dire que la précision que l'on peut certifier pour déterminer ces données est meilleure que le millième, alors qu'une précision de un centième est déjà une gageure, notamment dans le domaine de l'énergie. Souvent d'ailleurs, ce sont des pourcentages qui sont indiqués: le fameux camembert cher à tout tableur Excel ! C'est par exemple le cas pour comparer les données d'un pays à l'autre, les évolutions d'une année sur l'autre ou encore comparer plusieurs sources différentes dans le domaine de l'énergie.

Il faut cependant se méfier des comparaisons. N'oublions pas que *comparaison n'est pas raison.* Ce qui est bien pour un pays ne l'est pas obligatoirement pour un autre. Et puis la Nature ne connait pas les pourcentages ! Elle ne connait que les vrais valeurs, comme par exemple la concentration dans l'atmosphère des gaz à effet de serre, dioxyde de carbone, méthane et protoxyde d'azote en particulier.

Savoir déterminer les bonnes priorités

A force de parler de pourcentages, on en vient à oublier les vrais ordres de grandeur. Ceux-ci sont pourtant indispensables pour pouvoir déterminer une stratégie ancrée sur le long terme, en se fixant les bonnes priorités. Prenons l'exemple du taux d'émission de gaz à effet de serre - ici le méthane - par l'élevage, plus particulièrement celui de bovins, domaine dont on parle beaucoup dans les médias depuis quelque temps. Ce taux d'émission est presque aussi significatif en France que celui émis dans tout le domaine résidentiel, c'est-à-dire essentiellement l'émission de dioxyde de carbone par le chauffage au gaz. Énorme ! Arrêtons donc de manger de la viande rouge en France !

Revenons-en plutôt aux fondamentaux, c'est-à-dire à la contribution de ces deux domaines à la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, et non pas seulement à leur émission. Une large partie du dioxyde de carbone - environ 40% - est encore présent dans l'atmosphère bien au delà d'une centaine d'année. Chaque année donc depuis le début du XXème siècle, une grande partie du dioxyde de carbone qui est émis s'accumule dans l'atmosphère et conduit effectivement à une augmentation de cette concentration. Le reste est essentiellement absorbé par les océans et les forets. Par contre, le méthane est détruit pratiquement intégralement par réactions chimiques dans l'atmosphère au bout d'une cinquantaine d'années[1]. Et comme depuis une cinquantaine d'années la consommation de viande bovine en France diminue lentement mais régulièrement, il se détruit chaque année dans l'atmosphère un peu plus de méthane issu de la consommation de viande bovine depuis une cinquantaine d'année qu'il n'en est émis actuellement[2]. La concentration de méthane dans l'atmosphère dû à la consommation de viande bovine en France diminue donc ! Il faut ainsi en priorité s'occuper de diminuer nos émissions de dioxyde de carbone plutôt que d'avoir un message contre-productif de diminuer de façon draconienne notre consommation de viande bovine.

Savoir déterminer les bonnes priorités est une condition *sine qua non* pour pouvoir entraîner de façon cohérente citoyens, associations, collectivités territoriales, pouvoirs publics, dans une démarche dynamique et efficace de transformation écologique de nos pratiques quotidiennes. Il faut que le virus écologique[3], l'*éco-virus*, puisse absolument se propager à grande échelle, à la fois dans l'espace et dans le temps.

Attention à la tyrannie du tableur Excel

Pratiquement toutes les données que l'on trouve sur internet sont issues d'un calcul sur un tableur Excel. C'est un outil formidable pour faire des bilans, des statistiques, et des représentations graphiques des

[1] voir page 39
[2] voir page 43
[3] voir page 13

résultats obtenus. Mais attention à ne pas faire dire au résultat d'un calcul Excel - en bas à droite de la feuille - plus que ce qu'il ne peut en dire.

Prenons par exemple la contribution des énergies renouvelables[1], parcs d'éoliennes et de panneaux photovoltaïques, à la production totale d'électricité en Allemagne et en France. Elle représente en 2023 40 % en Allemagne et environ 15 % en France. La France a vraiment du retard - c'est un très mauvais élève diront certains - et doit mettre les bouchées doubles pour s'équiper immédiatement d'éoliennes et de panneaux photovoltaïques ! Si ce n'est que l'Allemagne émettait quand même cette même année environ 170 millions de tonnes de dioxyde de carbone de plus que la France pour la production d'électricité, presque la moitié de l'émission totale de la France, toutes énergies confondues. Le tableur Excel a simplement oublié de nous dire que les centrales nucléaires n'émettaient pas non plus de gaz à effet de serre !



Utilisation des voitures électriques

En France, les émissions de gaz à effet de serre dues aux voitures particulières représentent le poste d'émission annuel le plus important. Il est typiquement deux fois plus grand que celui dû à la production d'électricité. L'évolution du parc de voitures à essence ou diesel vers des voitures électriques est donc un enjeu majeur pour réduire rapidement et très fortement ces émissions.

Dans ce contexte, il convient d'abord de raisonner en terme de service qu'une voiture particulière est en droit d'offrir à son utilisateur, afin que cette évolution soit acceptée par le plus grand nombre et puisse s'inscrire dans la durée.

Une voiture pour quoi faire ?

Chaque voiture a une utilisation spécifique, pour une personne seule, en couple, en famille avec des enfants ou des petits-enfants, en ville ou à la campagne. Au niveau du type de voitures proposées par les différents constructeurs, il est néanmoins possible de mettre en évidence trois grandes catégories, en dehors d'un choix purement esthétique non connecté à une utilisation particulière:

- la première correspond aux voitures dites citadines, avec un retour à un domicile chaque soir. Ce type de voiture ne roule typiquement pas plus de 8 000 km par an, avec une utilisation pendant plus de 10 ans.
- la deuxième correspond aux voitures dites compactes, avec une utilisation à l'échelle d'un département, avec donc des trajets journaliers plus importants sans être très significatifs. Cela correspond par exemple à une utilisation dans les campagnes, avec aussi un retour à un domicile chaque soir. Ce type de voiture roule typiquement 16 000 km par an, pour une utilisation de 10 ans environ.
- enfin la troisième correspond aux berlines ou aux SUV compacts. Ce type de véhicule est utilisé pour des trajets inter-départements ou inter-régions. Il est caractérisé par le fait que la voiture ne rentre pas systématiquement à un domicile chaque soir. Ce type de voiture roule typiquement plus de 24 000 km par an, pour une utilisation de moins de 10 ans.

Comparaison voiture électrique et voiture à essence

Une telle comparaison a déjà été faite par l'ADEME[2]. Elle est résumée par la figure 1, tirée de ce rapport et où VE est l'acronyme de voiture électrique

[1] voir page 23
[2] voir le site internet: librairie.ademe.fr/mobilite-et-transport/5877-avis-de-l-ademe-voitures-electriques-et-bornes-de-recharges.html

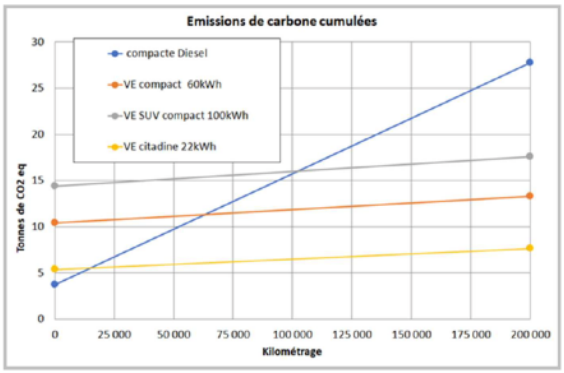


Figure 1: émissions de carbone cumulées pour différents types de voitures, selon l'ADEME.

Cette étude conduit à la conclusion suivante:

« Sur l'ensemble de sa durée de vie, une voiture électrique roulant en France, a un impact carbone 2 à 3 fois inférieur à celui d'un modèle similaire thermique, à condition que sa batterie soit de capacité raisonnable (< 60 kWh) »

Mais est-ce que cette comparaison est vraiment la plus judicieuse ? Le changement climatique, année après année, est piloté par le taux annuel d'émission de gaz à effet de serre, essentiellement ici du dioxyde de carbone (CO_2). Il convient donc de comparer les émissions de chaque catégorie de véhicules, qu'ils soient à essence ou électrique, selon le kilométrage qu'ils effectuent chaque année, et non pas selon le kilométrage total qu'ils feront durant toute leur durée de vie, typiquement de huit à douze ans. Une telle comparaison est facile à faire à partir de la figure ci-dessus, avec quelques hypothèses raisonnables :

- Les émissions de dioxyde de carbone lors de la construction de chaque voiture sont réparties sur l'ensemble de leur durée de vie typique. Cela correspond à un taux annuel de production de voitures relativement constant.
- Le kilométrage annuel effectué par une citadine, une voiture compacte et une berline ou SUV compact est fixé à 8 000 km, 16 000 km et 24 000 km respectivement.
- Les émissions de dioxyde de carbone lors de la construction de chaque voiture sont supposées proportionnelles au poids de celle-ci.
- La batterie des voitures électriques citadines, compactes et berlines ou SUV compacts correspond, comme dans l'étude de l'ADEME, à des énergies de 22 kWh, 60 kWh et 100 kWh respectivement.

On obtient alors la figure 2. Celle-ci représente les émissions annuelles de dioxyde de carbone pour les trois catégories de véhicules mentionnées ci-dessus, et pour un modèle à essence ou un modèle électrique.

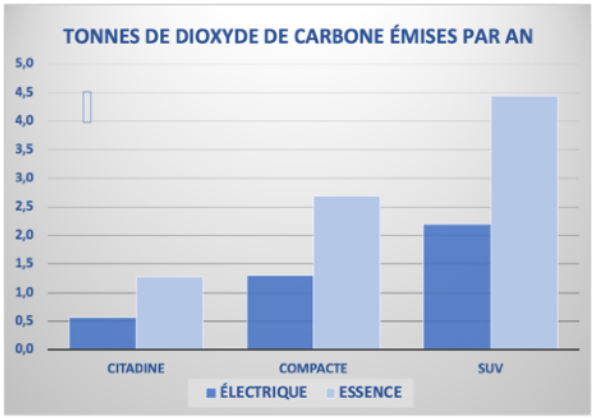


Figure 2: tonnes de dioxyde de carbone émises par an, pour différents types de voitures.

Avec les hypothèses de kilométrage annuel choisies, l'utilisation d'un véhicule électrique permet de réduire d'environ 50% les émissions annuelles de gaz à effet de serre. C'est effectivement une réduction par un facteur 2 de l'impact carbone, mais cette réduction est pratiquement identique quel que soit le type de véhicule. Cela est évidemment dû au fait qu'une berline ou un SUV compact parcourent bien plus de kilomètres par an qu'une voiture citadine. Bien sûr, la quantité totale de dioxyde de carbone émise reste bien plus élevée pour un SUV que pour une citadine, typiquement un facteur 4 plus grand. Par contre, le gain en tonnes de dioxyde de carbone émis lorsque l'on utilise une voiture électrique plutôt qu'une voiture à essence est bien plus grand pour une berline ou un SUV compact que pour une citadine: il est typiquement d'un peu moins d'une tonne pour une citadine et deux tonnes pour une berline ou un SUV compact. L'intérêt d'avoir un SUV électrique plutôt qu'à essence est alors évident.

Comment gérer les longs trajets en voiture électrique ?

Si la gestion de la recharge de la batterie d'une voiture électrique citadine ou compacte est relativement simple et souple d'utilisation, il n'en va pas de même pour une berline ou un SUV compact. L'installation de bornes de recharge de faible ou moyenne puissance peut se généraliser facilement dans les maisons individuelles, l'habitat collectif, ou encore dans les entreprises et services publiques. Cela permet d'assurer de façon harmonieuse la recharge de la batterie des voitures citadines et compactes, avec un appel de puissance relativement étalé sur toute la journée.

Pour les berlines ou SUV compacts, qui roulent le plus souvent sur autoroute pour de longs trajets, leur autonomie réelle est limitée, de l'ordre de 400 à 500 km. Il est alors nécessaire d'avoir à sa disposition, par exemple dans les stations services d'autoroute, des bornes de recharge de forte, voir très forte, puissance pour pouvoir bénéficier d'un temps

de recharge court, typiquement inférieur à une demi-heure. Si cela est effectivement techniquement possible, cela implique cependant un appel de puissance électrique très fort sur des temps courts et souvent au moment des repas, avec donc de fortes contraintes sur les réseaux électriques.

Il y a deux types de réponses possibles à ces contraintes, souvent rédhibitoires, posées par les longs trajets en voiture électrique. La première, triviale, est de les éviter tout simplement. Si cela est effectivement possible, en prenant le train, pour une personne seule ou un couple habitant une grande ville, cette solution est peu adaptée pour les personnes vivant à la campagne ou dans les petites villes, ou pour les familles avec enfants, sans une dégradation certaine du service que l'on attend d'une voiture. Et dans ce cas, il est fort probable qu'elle reste marginale.

Le deuxième type de réponse est de se tourner vers un autre type de voiture, tout en étant aussi peu émetteur de gaz à effet de serre qu'une voiture électrique. Une nouvelle filière[1] est en train de se développer en France dans ce domaine. Il s'agit de la voiture dite « à hydrogène ». Cela reste une voiture avec moteur électrique, mais au lieu d'être alimenté par une batterie, ce moteur est alimenté par une pile à combustible, avec un réservoir d'hydrogène. Le remplissage de ce réservoir, avec des pompes adaptées, est aussi rapide que faire le plein d'essence. De telles voitures existent déjà[2] et sont même commercialisées. Leur utilisation à grande échelle, pour les longs trajets, nécessite bien évidemment des infrastructures adaptées qui n'existent pas encore, mais le développement rapide de la filière dite « à hydrogène » en France et dans le monde permet d'entrevoir une telle utilisation d'ici par exemple 2035, date à laquelle les voitures à essence ou diesel neuves seront réglementées à la vente en Europe. Cela reste un défi majeur, avec une constance dans les choix politiques et industriels qui doit perdurer sur au moins une dizaine d'année.

Utiliser la voiture électrique avec raison

Le développement à grande échelle de l'utilisation de voitures électriques est une des solutions naturelles pour arriver à la neutralité carbone dans le domaine des transports. Mais comment le faire de façon raisonné ?

Le succès des berlines électriques Tesla n'a paradoxalement pas aidé à une démocratisation de l'utilisation des voitures électriques en France ! Les constructeurs automobiles européens ont, volontairement ou involontairement, voulu alors concurrencer Tesla avec des modèles semblables. Un simple coup d'œil sur le catalogue des voitures électriques des principaux constructeurs automobiles européens est assez éloquent de ce point de vue.

La caractéristique commune de ces modèles est d'être vendus à des prix bien plus élevés que les modèles similaires à essence, et de nécessiter l'installation de bornes de recharge ultra-rapides dans toutes les stations d'essence sur autoroute.

Le développement rapide de la voiture électrique passe au contraire d'abord par les modèles les plus accessibles financièrement, et qui ne nécessitent pas de gros investissements au niveau des bornes de recharge. La bonne priorité est ainsi de favoriser essentiellement les ventes de voitures citadines, voir compactes, avec typiquement des batteries de capacité inférieure à 45 kWh. Elles peuvent être proposées à des prix similaires voir même inférieurs aux modèles équivalents à essence compte-tenu des différentes primes dont ces voitures pourraient bénéficier en priorité.

Ces voitures n'ont besoin d'autre part que de bornes de recharge de puissance modérée. Ces bornes peuvent être installées facilement dans les maisons individuelles, mais aussi dans tous les habitats collectifs anciens, les entreprises et les administrations. C'est évidemment une condition sine qua non pour que la voiture électrique pour tous puisse se développer à grande échelle et rapidement ! Les interdictions liées aux ZFE (Zones à Faibles Émissions) deviendront alors complètement obsolètes.

Est-ce toujours vertueux d'avoir une voiture électrique ?

Une voiture électrique n'émet évidemment pas de dioxyde de carbone lors de son utilisation. Cela est certainement très bénéfique au niveau de la pollution urbaine, mais est-ce toujours vertueux au niveau d'un pays ? Pour cela, il convient juste de se poser la question de l'origine de l'électricité effectivement consommée pour la faire rouler.

Prenons par exemple l'utilisation d'une voiture de taille moyenne. En version essence, elle consommera environ six litres aux 100 km. En version électrique elle consommera environ 15 kWh aux 100 km. Comme un litre d'essence consommé émet environ 2,4 kg de CO_2 , la voiture à essence va donc émettre environ 15 kg de CO_2 aux 100 km. En France, l'électricité nécessaire à la recharge de la batterie de la voiture électrique provient de sources d'électricité à faible taux d'émission de gaz à effet de serre - centrales nucléaires, centrales hydrauliques, parcs d'éoliennes ou de panneaux photovoltaïques. Si l'on se base sur une émission de l'ordre de 10 g de

[1] voir page 53
[2] voir le site internet: h2-mobile.fr/vehicules/voiture-hydrogene/

dioxyde de carbone par kWh, la voiture électrique va émettre environ 150 g de CO_2 aux 100 km. C'est effectivement négligeable par rapport aux 15 kg émis par la même voiture fonctionnant à l'essence.

Qu'en est-il cependant en Allemagne par exemple, ou une large partie de l'électricité est produite par des centrales à charbon, avec une émission de 1.000 g de dioxyde de carbone par kWh. Dans ce cas, la voiture électrique va donc émettre, au niveau du bilan global du pays, également 15 kg de CO_2 aux 100 km, c'est à dire exactement la même quantité de dioxyde de carbone qu'une voiture à essence. Il n'y a alors aucun intérêt, au niveau du bilan global d'émission de gaz à effet de serre, de favoriser en Allemagne l'utilisation d'une voiture électrique plutôt qu'à essence. Il convient surtout en priorité d'arrêter définitivement les centrales à charbon.

On pourra argumenter que l'Allemagne à un fort taux d'équipement en parcs d'éoliennes et de panneaux photovoltaïques qui n'émettent que très peu de CO_2 . Et donc ces parcs peuvent être utilisés pour recharger les batteries électriques, avec ainsi un bilan très faible de 150 g de CO_2 aux 100 km, quand il y a du vent ou de la lumière. Mais c'est oublier que ces parcs ne pourront alors plus être utilisés pour limiter l'utilisation des centrales à charbon dans l'alimentation globale du pays - toujours quand il y a du vent ou de la lumière - à hauteur donc de 15 kWh pour chaque 100 km parcourus par une voiture électrique. Le bilan global va donc être toujours de 15 kg de CO_2 aux 100 km.

.



Empreinte carbone et service rendu

L'empreinte carbone de chacun d'entre nous correspond à la quantité de gaz à effet de serre que nous produisons annuellement par notre activité de tous les jours. Elle concerne donc différents domaines de la vie courante: alimentation, transports, logement, utilisation des services publics, des services numériques,.... Elle est calculée sur tout le cycle de vie de chaque produit, c'est-à-dire non seulement par rapport à l'émission des gaz à effet de serre nécessaires à la production de ces biens et services et à leur fonctionnement, mais aussi au transport de leur lieu de production à leur lieu de consommation, et au traitement des déchets engendrés par leur fin de vie.

L'empreinte carbone

Selon le site publique[1] permettant de calculer très simplement l'empreinte carbone de chacun d'entre nous, celle-ci correspond dans le contexte de vie et de consommation actuel en France à environ 8 tonnes de CO_2-équivalent[2] par an. Chacun peut ainsi tester en direct les domaines dans lesquels il est plus ou moins économe en émission de gaz à effet de serre. C'est un excellent moyen pour avoir une prise de conscience immédiate sur l'impact de chacun de nos gestes sur ces émissions. Bien évidemment, ces émissions ne concernent pas toujours la France et le temps présent, les produits consommés pouvant être fabriqués à l'étranger. Ils incluent aussi les émissions qui ont eu lieu soit dans le passé ou qui le seront dans le futur.

Une première constatation s'impose cependant lorsque l'on fait ce test. Il est facile de moduler, à la hausse comme à la baisse, ce taux moyen par activité selon nos habitudes de vie et notre situation sociale, familiale ou professionnelle. Mais la modulation finale, une fois toutes les activités renseignées, reste toujours relativement faible, typiquement de l'ordre de une à deux tonnes de CO_2-équivalent par an. On ne peut en effet jamais être excellent dans tous les domaines. Alors lorsque la page finale nous indique qu'il faut arriver à un objectif de 2 tonnes de CO_2-équivalent pour notre empreinte carbone - soit une réduction de plus de 6 tonnes par an - on quitte vite le site un peu découragé ! Et si l'on est découragé - et que l'on culpabilise - alors le virus écologique[3], l'*éco-virus*, encore une fois, a très peu de chances de se propager à grande échelle, à la fois dans l'espace et dans le temps.

[1] voir le site internet: nosgestesclimat.fr/
[2] voir page 39
[3] voir page 13

Pour quel service rendu ?

Pourquoi donc est-il très difficile de réduire son empreinte carbone de façon importante ? Il faut pour cela se rendre compte que dans notre vie de tous les jours, nous attendons un certain service - le *service rendu* - de toutes nos actions, selon notre situation sociale, familiale ou professionnelle et notre mode de vie. Une famille de deux enfants par exemple aura le plus souvent besoin d'une grande voiture, break ou SUV, pour se déplacer en famille pendant l'année et en vacances. Elle ne pourra pas n'avoir qu'une citadine électrique, sauf à utiliser le train pour partir en vacances. Ce service rendu doit donc se décomposer selon plusieurs critères:

- *Le service rendu indispensable*. C'est le service dont nous avons besoin pour nous nourrir, se loger, aller travailler. Pour reprendre l'exemple précédent d'une famille de deux enfants, avoir un SUV ne rentre pas dans cette catégorie.
- *Le service rendu de confort*. C'est le service que nous pouvons nous offrir pour avoir un certain confort, propre à chacun, dans toutes nos actions. Avoir un SUV pour notre famille de deux enfants rentre évidemment dans cette catégorie.
- *Le service rendu de plaisir*. C'est le service pour nous faire plaisir ! Il peut paraître superflu, mais il est souvent nécessaire pour que chacun puisse y trouver une motivation essentielle pour aller de l'avant, investir dans de nouveaux projets, en un mot pour transformer le monde.

La transformation écologique de nos pratiques quotidiennes doit prendre en compte ces services rendus, aussi importants les uns que les autres. Il faut le faire bien sûr de façon raisonné, sans gaspillage d'énergie, et en choisissant les actions les plus sobres en émission de gaz à effet de serre. Un SUV à essence de nouvelle génération, avec un moteur d'une puissance minimum et conduit de façon fluide et économe, consomme autant si ce n'est moins qu'une voiture compacte plus ancienne avec un moteur surdimensionné et une conduite sportive souvent inutile.

La neutralité carbone

L'Union Européenne a pour objectif d'arriver à la neutralité carbone en Europe en 2050. Cette neutralité implique que toutes les émissions annuelles de gaz à effet de serre devront être compensées à ce moment là par les mécanismes d'absorption de ces mêmes gaz, les fameux puits de carbone[1]. Comment y arriver en France compte-tenu de la discussion précédente ?

Au delà de la démarche citoyenne pour limiter son empreinte carbone, en analysant de près sa façon de consommer, il convient de regarder les domaines d'activité les uns après les autres en isolant les grandes priorités. C'est en effet en agissant « à la source » au niveau des processus industriels, du transport, du logement, et du traitement des déchets que l'empreinte carbone de chacun pourra diminuer de façon significative. Ces priorités résultent naturellement des grands ordres de grandeur développés dans ce document:

- *Au niveau industriel, minimiser les émissions de gaz à effet de serre au niveau de la production en France par le développement d'une ré-industrialisation « verte ».* Cela a un double avantage: d'une part éviter les transports inutiles du site de production à l'étranger au site de consommation en France, et d'autre part produire à partir de sources d'énergie plus décarbonées, comme la substitution de l'hydrogène au gaz naturel ou l'utilisation de centrales nucléaires plutôt que de centrales à charbon à l'étranger.
- *Développer une filière des transports complètement décarbonée.* Cela est déjà d'actualité avec la mise en service de voitures électriques citadines ou compactes à un prix de plus en plus abordable. Cela doit évoluer pour les modes de transport plus lourds - trains TER non électrifiés, bus, camions, voire SUV ou berlines - par le développement de toute une filière liée à l'utilisation d'hydrogène[2] « vert », en cohérence avec le développement des énergies renouvelables, parcs d'éoliennes et de panneaux photovoltaïques[3].
- *Enfin, au niveau du domaine résidentiel et tertiaire, arriver à une isolation thermique optimale pour tous les bâtiments, privés et publiques.* Cela ne peut évidemment pas se faire tout de suite pour tout le monde, tout simplement par le besoin de former de plus en plus d'artisans dans ces corps de métier. Dans cette perspective, il n'est certainement pas une priorité de continuer à favoriser l'installation de panneaux photovoltaïques sur les toits des maisons individuelles - qui demande aussi beaucoup de main d'œuvre - mais plutôt de se concentrer sur l'isolation des bâtiments et favoriser l'installation de parcs de panneaux photovoltaïques sur de grandes surfaces, biens moins onéreuse[4], et qui peuvent être construits à proximité de sites de fabrication d'hydrogène.

Qu'en est-il cependant du domaine agricole et de la gestion des déchets naturels ? Contrairement aux domaines précédents, celui-ci est principale-

[1] voir page 39
[2] voir page 53
[3] voir page 15
[4] voir page 37

ment émetteur de méthane et non pas de dioxyde de carbone. Pour des raisons de représentation uniforme de l'effet de tous les gaz à effet de serre sous une même unité, le Giec a mis au point la notion de CO_2-équivalent. Cette unité permet de mesurer l'effet de tous les gaz à effet de serre sur le réchauffement climatique, en les étalant sur cent ans. Il n'en demeure pas moins que le méthane est un gaz à effet de serre dont la durée de résidence dans l'atmosphère est très différente de celle du dioxyde de carbone: le méthane est détruit pratiquement intégralement dans l'atmosphère au bout d'une cinquantaine d'année, alors que 40% du dioxyde de carbone émis y est encore présent au delà d'une centaine d'année[1].

Qu'est ce que cela implique ? En France, le méthane est émis principalement dans l'élevage et dans la décomposition des déchets agricoles. Pour ces derniers, le méthane produit peut être récupéré en grande partie et utilisé dans des centrales thermiques fonctionnant au méthane. C'est tout l'enjeu de la filière de méthanisation qui se développe rapidement en France. Pour ce qui concerne le méthane issu de l'élevage, il ne peut pas s'accumuler dans l'atmosphère en France dans la mesure ou la consommation de viande bovine par exemple diminue régulièrement depuis une cinquantaine d'années, après avoir été constante pendant de nombreuses années. Il se détruit ainsi dans l'atmosphère autant de méthane qu'il n'en est émis. Il faut donc juste accompagner cette tendance naturelle sans avoir besoin de mesures coercitives pour tout un chacun afin de diminuer la concentration de méthane dans l'atmosphère en France.

En d'autres termes, la neutralité carbone est d'ores et déjà atteinte dans le cas de l'émission de méthane en France. Ce n'est malheureusement pas le cas dans beaucoup d'autres pays avec une forte augmentation de l'émission de méthane lors des processus d'extraction de pétrole et de gaz.



Comparaison France Allemagne

Est-ce qu'une solution intéressante pour un pays l'est aussi pour un autre ? Il est important de bien cerner les caractéristiques de production d'énergie de chaque pays avant de trouver la bonne réponse à cette question. Un excellent exemple est donné par la comparaison de la situation en France et en Allemagne, les deux pays les plus riches de l'Union Européenne en terme de Produit Intérieur Brut (PIB).

L'Allemagne est plus peuplée que la France - 84 millions d'habitants pour 68 millions en France - avec un PIB aussi plus important - 5.300 milliards de dollars pour 3.700 milliards en France. La température moyenne y est plus basse qu'en France d'environ 3 à 4 degrés. Toutes ces différences permettent d'anticiper une consommation d'énergie plus grande en Allemagne qu'en France. Mais qu'en est-il si l'on y regarde d'un peu plus près ?

Consommation d'énergie

Si l'on se concentre sur la consommation nette d'énergie selon les grands domaines d'activité du pays, on retrouve tout naturellement une plus grande consommation d'énergie en Allemagne[2] (environ 2100 TWh[3] en 2023) par rapport à la France (1500 TWh), conformément aux caractéristiques propres de chaque pays rappelées ci-dessus. Le détail pour chaque activité est indiqué sur la figure 1.

Les variations que l'on observe selon chaque activité sont aussi toutes naturelles. Le domaine du résidentiel reproduit parfaitement le même type d'augmentation observé sur la consommation totale. La consommation dans les transports est, une fois corrigée des caractéristiques propres à chaque pays, relativement plus importante en France. Cela traduit l'utilisation du réseau routier bien plus grand en France, avec un réseau bien plus développé qu'en Allemagne. La consommation dans l'industrie est

[1] voir page 39
[2] voir le site internet: allemagne-energies.com/
[3] voir page 35

par contre plus grande en Allemagne, conformément à la plus grande industrialisation de ce pays comparé à la France. Par contre, la consommation dans le domaine du tertiaire est proportionnellement plus grande en France, signe du développement plus fort de cette activité en France. Enfin, l'agriculture n'est pas une source de consommation d'énergie très grande dans les deux pays.

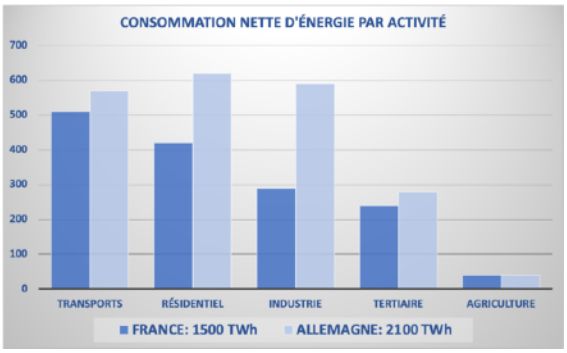


Figure 1: comparaison de la consommation nette d'énergie entre la France et l'Allemagne en 2023, par activité.

Toutes ces observations ne montrent aucune différence significative entre ces deux pays au niveau de la consommation d'énergie, une fois corrigée de leurs différences objectives. Qu'en est-il par contre au niveau des sources de production d'électricité ?

Production d'électricité

Les différences entre les deux pays pour ce qui concerne la production d'électricité sont ici flagrantes, comme on peu le voir sur la figure 2. Elles tiennent en deux constatations: l'Allemagne n'a plus de centrales nucléaires en activité, alors que la France n'a pratiquement plus de centrales à charbon et à fuel en activité.

Cela induit deux stratégies très différentes pour ce qui concerne l'alimentation en électricité de chaque pays. En France, l'alimentation de base est assurée par les centrales nucléaires. Elle couvre en très grande partie les consommations moyennes d'électricité que l'on peut anticiper d'un jour sur l'autre. Leur production est cependant bridée pour faire place à la production d'électricité que l'on peut anticiper des parcs d'éoliennes et de panneaux photovoltaïques. Le surplus de production de ces parcs est aussi exporté vers nos pays voisins.

Toutes les variations de production ou de consommation non prévisibles sont alors assurées par les sources d'électricité pilotables pouvant gérer très rapidement un appel de puissance. C'est le cas des centrales hydrauliques et des centrales à gaz.

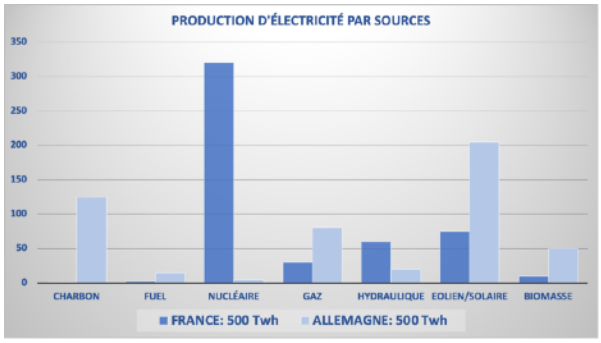


Figure 2: comparaison de la production d'électricité entre la France et l'Allemagne en 2023, par sources.

La situation en Allemagne est à l'opposé. L'alimentation de base en électricité doit être assurée par les sources disponibles d'électricité pilotables, c'est-à-dire les centrales thermiques à charbon, gaz ou fuel - soit les centrales les plus émettrices de gaz à effet de serre - en complément des centrales hydrauliques. Pendant les périodes d'ensoleillement en journée, ou en présence de vent, les parcs d'éoliennes et de panneaux photovoltaïques permettent cependant de minimiser l'utilisation de ces centrales thermiques. De par leur intermittence, ces parcs ne peuvent cependant en aucun cas se substituer intégralement à ces centrales thermiques. La production d'électricité par les centrales hydrauliques est relativement faible en Allemagne.

La France a par contre un retard réel par rapport à l'Allemagne pour le développement des centrales à biomasse. Celles-ci permettent d'une part de valoriser de nombreux déchets et d'autre part, par leur installation proche de lieux de vie, d'alimenter des réseaux de chaleur urbains[1].

Il est intéressant de noter qu'en 2023 l'Allemagne et la France ont produit la même quantité d'électricité. Si l'on tient compte par contre du solde d'exportation d'électricité de la France, 50 TWh, et du solde d'importation de l'Allemagne, 10 TWh, on retrouve une surconsommation naturelle de l'Allemagne par rapport à la France.

Emissions de gaz à effet de serre

Le bilan en ce qui concerne les émissions de gaz à effet de serre, en France et en Allemagne[2], est alors une conséquente directe de la structuration de l'alimentation en électricité de ces deux pays, comme discuté ci-dessus. Il est indiqué sur la figure 3, selon les différentes activités du pays. Les données sont indiquées ici en terme de CO_2 équivalent pour pouvoir comparer les émissions de dioxyde de carbone et de méthane.

[1] voir page 52
[2] voir le site internet : allemagne-energies.com

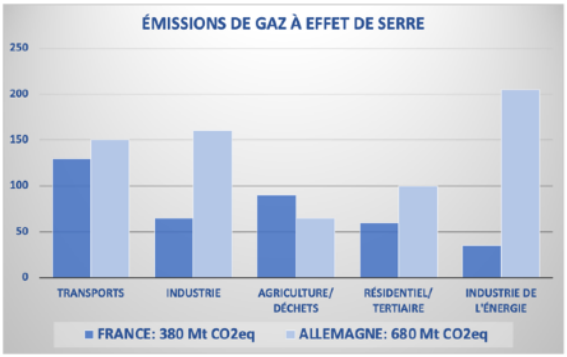


Figure 3: comparaison des émissions annuelles de gaz à effet de serre entre la France et l'Allemagne en 2023

Les émissions dans les domaines des transports, de l'industrie, ou encore du domaine résidentiel et tertiaire sont parfaitement en ligne avec la consommation d'énergie par activité indiquée sur la figure 1. Les émissions dans le domaine de l'industrie de l'énergie - essentiellement dans le domaine de la production d'électricité - est une conséquence naturelle de l'utilisation massive de centrales thermiques à charbon et à gaz dans la production d'électricité en Allemagne, et ceci malgré le fort taux de développement d'énergie renouvelable, parcs d'éoliennes et de panneaux photovoltaïques. Cela correspond typiquement à un surplus d'émission de gaz à effet de serre d'environ 170 *Mt CO_2 eq*, presque la moitié du taux d'émission français, toutes sources d'énergie confondues.

Le domaine de l'agriculture et de la gestion des déchets est essentiellement émetteur de méthane. Mesurées en terme de CO_2 équivalent, les émissions de ces domaines sont non négligeables, en France comme en Allemagne. Contrairement au dioxyde de carbone cependant, ce gaz est pratiquement entièrement détruit dans l'atmosphère au bout d'une cinquantaine d'année[1]. Que ce soit en Allemagne comme en France, les émissions de méthane dans ces deux domaines diminuent aussi constamment depuis une cinquantaine d'année et donc la concentration de méthane dans l'atmosphère diminue aussi dans ces deux pays: le méthane émis depuis une cinquantaine d'année dans l'atmosphère est régulièrement détruit année après année, et celui émis actuellement ne le compense pas complètement.

[1] voir page 39

DIX LEÇONS À MÉDITER

Nous avons rassemblé ci-dessous dix leçons que l'on peut retenir des pages de ce document. Elles concourent toutes dans la même direction pour faire en sorte que la transformation écologique de nos pratiques quotidiennes se généralise sur tout le territoire français, rapidement et de façon pérenne. En d'autres termes, pour que le virus écologique, l'*éco-virus*, puisse se propager rapidement à grande distance, à la fois dans l'espace et dans le temps.

1. Ne pas se tromper de message

Il est essentiel, dans le contexte actuel, de se fixer les bonnes priorités dans toutes nos actions de réduction des émissions de gaz à effet de serre en France. Pour cela, il ne faut évidemment pas se tromper de message dans toute notre communication, et donc *prendre la raison par le bon bout.* Si nous ne le faisons pas, nous allons soit perdre du temps,soit perdre de l'argent - l'un comme l'autre sont très précieux - soit encore - ce qui est pire - s'engager sur une voie sans issue. Les leçons qui suivent en sont une illustration.

2. Les interdictions et culpabilisations ne sont pas de mise

La transformation de nos pratiques quotidiennes pour réduire rapidement et sur le long terme nos émissions de gaz à effet de serre nécessite de tout mettre en œuvre pour que l'*éco-virus* puisse se propager à grande échelle. Pour cela, il faut éviter toutes les situations qui pourraient constituer des barrières à sa propagation. Parmi celles-ci, les barrières psychologiques ne sont certainement pas à négliger. Les interdictions ou encore la culpabilisation du citoyen ne sont pas de mise.

3. Chacun doit trouver les solutions qui lui sont propres

La propagation de l'*éco-virus* doit se faire dans le plus de directions possibles, et dans différents domaines. Il s'agit d'une part des acteurs en présence - citoyens, associations, industriels, collectivités territoriales et état - et d'autre part des domaines du logement, de la nourriture, des transports. Chacun doit y contribuer de façon cohérente avec sa spécificité, ses responsabilités et ses capacités financières propres, et tous en même temps. Se défausser de ses responsabilités sur un autre acteur n'est pas la bonne solution pour favoriser la propagation de l'*éco-virus*.

4. Se concentrer sur les ordres de grandeur, pas sur les pourcentages

Les discussions sans fin sur les pourcentages d'augmentation, de diminution, ou encore de comparaison d'un pays à un autre ne nous disent rien sur la vraie valeur des nombreuses quantités qui contrôlent le réchauffement de l'atmosphère dans le monde. Et il ne sert à rien de discuter de la valeur à l'unité près de ces quantités. Cela ne sert qu'à entretenir les disputes stériles à n'en plus finir entre experts et/ou journalistes, en éludant les vraies questions. Seuls les ordres de grandeur sont pertinents pour comprendre les tenants et les aboutissants de toutes les questions qui se posent dans ce domaine.

5. Tous les gaz à effet de serre n'ont pas les mêmes échelles de temps

Le réchauffement climatique est lié à la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère[1], et donc à leur accumulation au cours du temps. Une grande partie du dioxyde de carbone - environ 40% - émise chaque année est encore présente après une centaine d'année, alors que le méthane est détruit presque intégralement après environ 50 ans. Il suffit donc de s'assurer, à l'échelle d'une cinquantaine d'années, que les émissions annuelles de méthane restent constantes ou même diminuent pour que leur concentration dans l'atmosphère reste aussi constante, voir même diminue. C'est actuellement le cas en France. La première priorité doit donc être de réduire rapidement et de façon substantielle nos émissions de dioxyde de carbone car celui-ci continue de s'accumuler même après une centaine d'année, tout en accompagnant de façon raisonnée la diminution de nos émissions de méthane.

6. Ce qui est vrai pour un pays ne l'est pas obligatoirement pour un autre

Réduire nos émissions de gaz à effet de serre dans le domaine de l'énergie implique de s'intéresser à toute la structure de consommation énergétique d'un pays, et donc aussi à toute sa structure de production d'électricité. Et cette structure est nécessairement différente d'un pays à l'autre. Les solutions que l'on doit trouver ne sont donc pas obligatoirement les mêmes d'un pays à l'autre. On peut le voir par exemple en comparant la situation en France et en Allemagne[2].

7. La France ne peut pas s'isoler de ses voisins européens

Les gaz à effet de serre sont émis par toutes les activités humaines sur le territoire de chaque pays. Ils sont ensuite véhiculés à grande distance par les mouvements des grandes masses d'air à l'échelle d'un continent et plus généralement du monde en-

[1] voir la page 39
[2] voir la page 23

tier. La situation en France dépend donc aussi des émissions de gaz à effet de serre de nos pays voisins, et cela depuis le début du XXème siècle. L'action raisonnée de l'Union Européenne est donc essentielle pour arriver à circonscrire les effets du réchauffement climatique en Europe. Et cette action doit s'adapter nécessairement à la structure de production d'électricité de chaque pays.

8. Comment développer l'utilisation de voitures électriques ?

Le développement à grande échelle de l'utilisation de voitures électriques[1] est une condition essentielle pour réduire nos émissions de gaz à effet de serre dans le domaine des transports. Il faut le faire aussi rapidement. Pour cela, il convient de favoriser les voitures les plus petites, de type citadines ou compactes, dont les prix sont le plus proche des voitures similaires à essence. Et favoriser en même temps les lieux de recharge les plus adaptés à ces types de voitures. De ce point de vue, le développement des points de recharge dans les parkings d'habitats collectifs, d'entreprises ou de services publics - plutôt que sur les parkings d'autoroute - est une condition *sine qua non* pour un développement à grande échelle de la voiture électrique.

9. Éoliennes et panneaux photovoltaïques: pour faire quoi ?

Dire qu'il faut développer les parcs d'éoliennes et de panneaux photovoltaïques pour réduire nos émissions de gaz à effet de serre ne suffit pas. Il faut d'abord définir dans quelles conditions il convient de les utiliser. En France, cela n'est pas[2] de les coupler au réseau national comme n'importe quelle autre source de production d'électricité. Il faut d'abord définir une nouvelle source de consommation d'électricité en adéquation avec le caractère intermittent de ces sources, et qui permette de réduire réellement et à grande échelle nos émissions de gaz à effet de serre. La filière hydrogène[3] est actuellement la solution la plus adaptée pour une telle utilisation.

10. Etre renouvelable ne suffit pas

Depuis plusieurs dizaines d'années, le langage commun est de développer rapidement et à grande échelle la mise en œuvre d'énergies renouvelables pour réduire nos émissions de gaz à effet de serre. Mais il faut bien réaliser que le simple fait d'être renouvelable ne signifie pas que cela permette de réduire nos émissions de gaz à effet de serre. Ces deux notions ne sont pas équivalentes. Elles le sont effectivement dans le cas des centrales hydrauliques - qui peuvent au pied levé remplacer l'utilisation de centrales thermiques à gaz particulièrement polluantes - mais pas dans celui des parcs d'éoliennes et de panneaux photovoltaïques. Tout simplement parce que la première est pilotable instantanément, alors que les seconds ne le sont pas.

[1] voir la page 18
[2] voir la page 15
[3] voir la page 53

ANNEXES

ORDRES DE GRANDEUR

La nature ne connait pas les pourcentages, elle n'est sensible qu'aux vraies valeurs. « *Trois fois rien font toujours rien !* ». Et 100% d'augmentation d'une quantité très faible reste souvent plus petite que 1% d'augmentation d'une quantité très grande.

Il est donc essentiel de se concentrer en tout premier lieu sur les ordres de grandeur de ces valeurs. Cela est indispensable pour pouvoir déterminer en toute connaissance de cause les vrais priorités dans nos actions de réduction de nos émissions de gaz à effet de serre. Et ces priorités ne sont pas obligatoirement les mêmes d'une personne à une autre, d'une organisation à une autre, d'une collectivité territoriale à une autre et même d'un pays à un autre.

Puissance et énergie

Production d'électricité en France

Consommation d'énergie en France

Émissions de gaz à effet de serre



Puissance et énergie

Lorsque l'on achète une voiture, l'une des premières informations dont on s'inquiète est la puissance de son moteur, mesurée en chevaux. Cette puissance détermine la capacité de la voiture à accélérer très rapidement. Et le prix d'achat de la voiture dépend bien évidemment de la puissance de son moteur. Par contre, pour rouler, la voiture a besoin absolument d'un carburant. C'est celui-ci que l'on paye pour la faire avancer. La quantité de carburant consommée, on parle alors de quantité d'énergie consommée, peut se mesurer en utilisant différentes unités. Le conducteur de la voiture la mesure en litres d'essence consommés. Si l'on veut pouvoir comparer l'énergie consommée, ou produite, dans différents processus – voitures, centrales thermiques à gaz ou centrales nucléaires par exemple – il convient cependant d'utiliser une unité de mesure commune. Celle utilisée mondialement est la tonne équivalent pétrole (tep), avec son multiple le plus utilisé, le million de tep (Mtep).

Pour mesurer la production et la consommation d'électricité, il est cependant bien plus naturel d'utiliser comme unité de puissance le watt. L'énergie consommée sera quant-à-elle mesurée en watt-heure (Wh). Un Wh correspond à l'énergie produite – ou consommée – par une source ou un appareillage électrique d'une puissance d'un watt fonctionnant pendant une heure.

Au niveau de la production et de la consommation d'électricité à l'échelle d'un pays, on utilise plus couramment des multiples de ces unités: le kilo-watt (kW, mille watts), le méga-watt (MW, un million de watts) ou le giga-watt (GW, un milliard de watts). Celles de l'énergie produite ou consommée sont le kilo-watt-heure (kWh, mille watt-heures), le méga-watt-heure (MWh, un million de watt-heures), le giga-watt-heure (GWh, un milliard de watt-heures) ou encore le téra-watt-heure (TWh, mille milliards de watt-heures).

La présentation des données énergétiques est faite maintenant dans les rapports officiels en favorisant comme unité le téra-watt-heure. Cela permet de comparer facilement les productions ou consommations d'énergie avec comme référence la production d'électricité. La conversion d'une unité à l'autre se fait selon la correspondance officielle suivante: une Mtep est équivalent à 11,6 TWh, et donc un TWh correspond à 0,086 Mtep.



Production d'électricité en France

Toutes les données officielles concernant la production d'électricité en France sont rassemblées dans un rapport annuel de RTE (Réseau de Transport d'Électricité). Les principales sont rassemblées ci-dessous. Elles sont largement arrondies afin de faire émerger les grandes tendances. C'est en effet à partir de ces grandes tendances que l'on peut mieux comprendre comment agir sur la production d'électricité en France afin de réduire efficacement, et sur le long terme, nos émissions de gaz à effet de serre –

essentiellement ici le dioxyde de carbone (CO_2). Les données présentées[1] correspondent à l'année 2023. Elles sont toutes exprimées en TWh. La répartition par sources de la puissance injectée dans le réseau français[2] est indiquée, tous les quarts d'heure, par RTE.

Production d'électricité par sources

Les principales sources d'électricité en France sont les mêmes depuis de nombreuses années: centrales thermiques à gaz (Gaz) ou a biomasse (Biomasse), centrales nucléaires (Nucléaire), centrales hydrauliques (Hydraulique), éoliennes et panneaux solaires photovoltaïques (Eolien/solaire). Nous ne considérons pas ici les centrales thermiques au charbon ou au fuel qui ont actuellement une production parfaitement négligeable en France. Nous indiquons sur la figure 1 la production annuelle de ces sources.

L'alimentation de base est assurée par les centrales nucléaires, qui produisent en moyenne environ 65 % de l'électricité. A coté de cette alimentation de base, il convient d'avoir des sources d'électricité permettant de palier aux fluctuations sur des échelles de temps très courtes non seulement de la consommation d'électricité française mais aussi de la production d'électricité par les sources intermittentes, comme les éoliennes et les panneaux photovoltaïques.

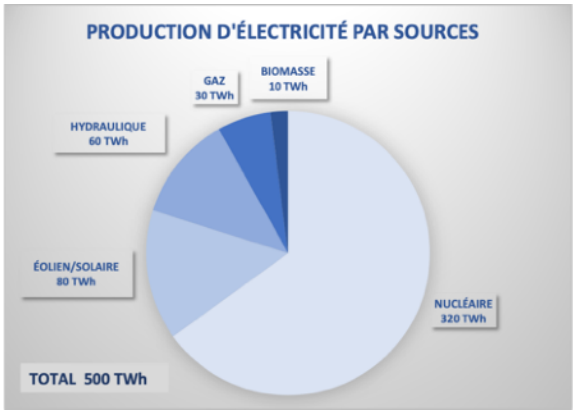


Figure 1: production annuelle d'électricité en France en 2023, par sources

Ces sources doivent également assurer un complément d'alimentation électrique lors des pics de consommation en fin de journées d'hivers par exemple. C'est le rôle dévolu aux centrales hydrauliques et aux centrales à gaz qui assurent environ 20 % de la production d'électricité. Celles-ci ne sont pas utilisées en permanence à pleine puissance. Elles sont cependant indispensables pour une bonne gestion du réseau électrique.

Les énergies renouvelables – centrales à biomasse, éoliennes et panneaux photovoltaïques – assurent enfin environ 20% de la production d'électricité. Ces sources d'électricité renouvelables se développent rapidement. Les centrales à biomasse ont pour avantage de pouvoir être très délocalisées, avec une production de chaleur utilisée localement dans les réseaux de chaleur. Leur production d'électricité, et la puissance installée, reste cependant encore marginale mais devrait se développer très rapidement au niveau local.

Il est intéressant de noter que la seule source d'électricité à fort taux d'émission de gaz à effet de serre[3] en France – les centrales à gaz – ont une production très modeste, de l'ordre de 6% de la production totale.

Consommation électrique par activité

La figure 2 représente la consommation d'électricité par type d'activité, en y incluant la quantité d'électricité exportée, et les pertes lors de l'acheminement de l'électricité sur les réseaux nationaux.

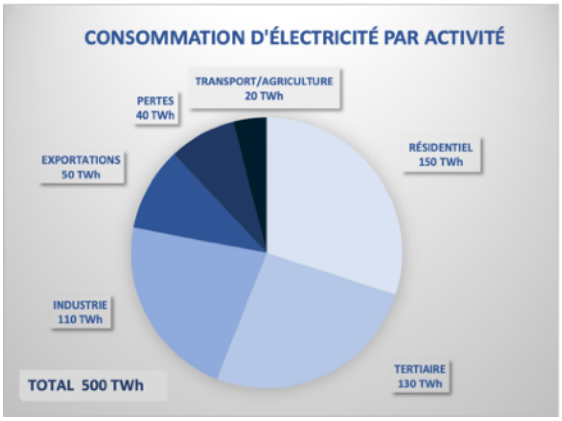


Figure 2: consommation annuelle d'électricité en France en 2023, par activité

La quantité d'électricité exportée vers nos pays voisins est particulièrement importante, et correspond à la production d'électricité d'environ huit réacteurs nucléaires. Elle correspond aussi à 60% de la production d'électricité des parcs d'éoliennes et de panneaux photovoltaïques. Comme nous le verrons en page 43, ces exportations participent à la réduction des émissions de gaz à effet de serre chez nos pays voisins, et contribue ainsi aussi d'une certaine manière au bilan carbone de la France.

Coûts de production

La comparaison des coûts de production des différentes sources de production d'électricité doit tou-

[1] voir le site internet: www.rte-france.com
[2] voir le site internet: www.rte-france.com/eco2mix/la-production-delectricite-par-filiere
[3] voir page 47

jours se faire en considérant les services rendus par ces différentes sources. Comme les investissements pour les sources actuellement en fonctionnement, ou qui le seront prochainement, sont déjà engagés, nous indiquerons ici les ordres de grandeur des coûts prévisibles à 10 ans, soit en 2035.

Dans ce cadre, le coût de production des centrales thermiques à gaz ou des centrales hydrauliques ne sera pas considéré. La flexibilité de ces centrales est indispensable pour assurer la stabilité de l'approvisionnement national en électricité, et donc un service rendu irremplaçable, quoi qu'il en coûte. Les centrales thermiques à biomasse jouent un rôle essentiel au niveau de la valorisation des déchets et de la production locale de chaleur. Leur coût est donc à étudier au cas par cas selon le service rendu. Elles ne seront pas étudiées ici non plus.

Les seules sources d'électricité à fort développement dans les années à venir sont donc les centrales nucléaires, et les parcs d'éoliennes et de panneaux photovoltaïques. Leur coût de production moyen que l'on peut estimer en 2035 est indiqué dans le tableau 1, selon le rapport RTE sur les futurs énergétiques[1]. Ils doivent être compris comme des ordres de grandeur.

Les coûts prévisibles des parcs d'éoliennes terrestres ou offshores posés, ainsi que des panneaux photovoltaïques au sol ou en grande toitures sont similaires, et environ deux fois plus économiques que le coût de l'électricité d'une centrale nucléaire EPR de deuxième génération (EPR2), pour une construction de 8 centrales. Les services rendus par ces centrales ne sont évidemment pas les mêmes dans la mesure ou les parcs d'éoliennes et de panneaux photovoltaïques ne produisent de l'électricité qu'en présence de vent ou de lumière. Toutes ces sources sont donc complémentaires et doivent être développées simultanément.

Le coût de production d'un parc d'éoliennes offshore flottant est significativement plus élevé qu'un parc terrestre. Il peut fonctionner par contre de façon plus régulière en présence d'un vent plus soutenu. Sa production d'électricité reste néanmoins intermittente et ne remplace donc pas la nécessité d'avoir une production continue d'électricité par ailleurs.

Le coût de production de panneaux photovoltaïques sur des petites toitures en maisons individuelles est particulièrement élevé comparé à l'installation sur de grandes surfaces en toiture de parking par exemple ou au sol. Cela est dû au coût d'installation élevé, et à l'absence de réduction de coût par une installation à grande échelle. Alors que ce type d'installation était le plus développé il y a encore quelques années, il serait naturel qu'il soit abandonné dans les années à venir compte tenu de son coût prohibitif.

Éoliennes			*Panneaux photovoltaïques*			*Centrales nucléaires*
Terrestre	Offshore posé	Offshore flottant	Au sol	Grandes toitures	Petites Toitures	EPR2
40	45	70	35	45	130	90

Tableau 1: coûts de production des différentes sources de production d'électricité, à échéance de 2035, exprimés en €/MWh

[1] voir le site internet: www.rte-france.com



Consommation d'énergie en France

Au delà de la production d'électricité, il convient aussi de bien comprendre quelles sont les grandes tendances au niveau de la consommation d'énergie de façon plus générale. Toutes les données sont disponibles sur le site du gouvernement pour le développement durable[1]. Les données présentées ici correspondent à l'année 2023. Elles sont toutes exprimées en téra-watt-heures[2] (TWh).

Consommation d'énergie par sources

Deux sources d'énergie se partagent environ les deux tiers de la consommation totale d'énergie en France: les produits pétroliers (Pétrole) utilisés dans le chauffage et les transports, et l'électricité (Électricité). Le gaz (Gaz) utilisé dans le chauffage des bâtiments et dans l'industrie et les énergies renouvelables thermiques (Enr thermiques), c'est-à-dire le bois, les déchets de bois, les biocarburants ou encore les panneaux solaires thermiques, représentent le troisième tiers, pratiquement à égalité. La répartition de ces différentes sources est indiquée sur la figure 1.

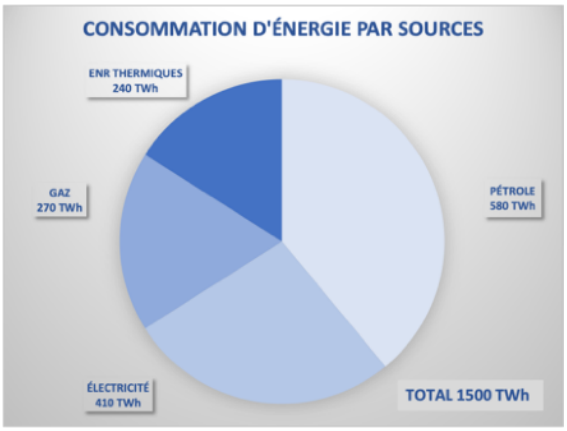


Figure 1: consommation annuelle d'énergie en France en 2023, par sources.

Cette répartition indique clairement dans quelles directions il convient de s'engager prioritairement pour réduire de façon significative nos émissions de dioxyde de carbone: le chauffage et les processus industriels pour le gaz, le domaine des transports pour les produits pétroliers. Le domaine de l'électricité quant-à-lui ne produit que très peu de gaz à effet de serre en France[3].

Consommation d'énergie par activités

La consommation d'énergie selon les types d'activités est indiquée sur la figure 2. Cette répartition confirme le rôle prépondérant joué par les transports dans la consommation de produits pétroliers, ainsi que par le domaine résidentiel pour ce qui concerne le chauffage au gaz ou au fuel.

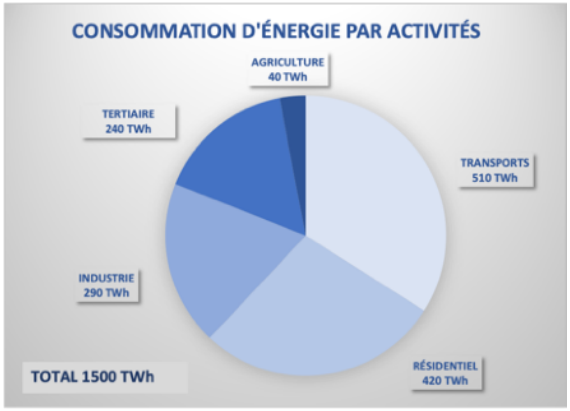


Figure 2: consommation annuelle d'énergie en France en 2023, par activités.

[1] voir le site internet: statistiques.developpement-durable.gouv.fr
[2] voir page 35
[3] voir page 40



Émissions de gaz à effet de serre

Le réchauffement climatique que l'on observe dans le monde entier année après année est dû à l'émission dans l'atmosphère de gaz à effet de serre. Parmi tous ces gaz, le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4) et le protoxyde d'azote (N_2O) sont ceux dont les effets sont les plus notables. Le dioxyde de carbone est émis principalement lors de la combustion de produits pétroliers ou de gaz dans les transports, le chauffage des bâtiments ou les processus industriels. Le méthane est produit par la décomposition des déchets végétaux ou lors de la digestion des ruminants. Il est aussi produit lors des processus d'extraction de pétrole, de gaz ou de charbon, mais cela ne concerne pas la France. Le protoxyde d'azote, dit aussi gaz hilarant, provient quant-à-lui de l'emploi d'engrais azotés, de la transformation des déjections animales ou encore de certains processus industriels. Ces deux derniers gaz concernent essentiellement les activités agricoles et la gestion des déchets.

L'émission de protoxyde d'azote ne représente en France que 5% de l'émission totale de gaz à effet de serre, mesurée en tonnes de CO_2 équivalent. Elle a diminué d'environ 60% depuis 2010, et devrait continuer à le faire dans les années à venir. Nous n'en parlerons pas plus ici.

Concentration dans l'atmosphère

Tous ces gaz, une fois émis dans l'atmosphère, n'ont pas tous la même influence sur le réchauffement climatique. Leur pouvoir de réchauffement, étalé sur une période donnée, est mesuré par un paramètres appelé Pouvoir de Réchauffement Global (PRG). Celui-ci est calculé le plus souvent sur une période de 100 ans. Il est égal à un par définition pour le dioxyde de carbone, 28 pour le méthane et 270 pour le protoxyde d'azote. Afin de pouvoir comptabiliser les effets sur le long terme de tous ces gaz avec une même unité, le Giec (Groupe d'expert intergouvernemental sur l'évolution du climat) a défini la tonne de CO2 dit équivalent, notée *t CO_2 eq*, en multipliant la tonne émise de chaque gaz à effet de serre par son pouvoir de réchauffement global. Ainsi, même si la quantité de méthane émise dans l'atmosphère, mesurée en tonnes, est bien plus faible que celle du dioxyde de carbone, son influence sur le réchauffement peut être significatif, avec un PRG de 28 sur une période de 100 ans. Les millions de tonnes de *CO_2 eq* sont notées *Mt CO_2 eq (Méga)* et les milliards *Gt CO_2 eq (Giga)*.

Cette manière de comptabiliser l'influence des gaz à effet de serre sur le réchauffement climatique est sans doute pratique pour suivre l'évolution globale de leurs émissions sur de longues périodes, ou encore pour comparer les émissions globales dans différents pays du monde. Par contre, cela n'est pas vraiment la bonne unité lorsqu'il s'agit de définir les priorités pour arriver à une neutralité carbone en Europe en 2050.

En effet, la neutralité carbone implique un équilibre entre les émissions de dioxyde de carbone ou de méthane et leur absorption par des puits de carbone ou leur destruction par réactions chimiques dans l'atmosphère. Le taux de présence des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, mesuré en pourcentage de la quantité initialement émise, varie ainsi en fonction du temps. Nous avons indiqué ce taux sur la figure 1, pour le dioxyde de carbone et le méthane[1].

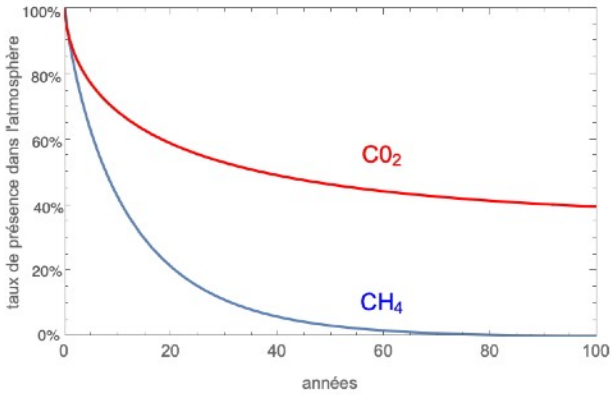


Figure 1:taux de présence dans l'atmosphère en fonction du temps pour le dioxyde de carbone et le méthane .

[1] voir le site internet : https://lmnarchitects.com/lmn-research/04-the-science-of-global-warming (en anglais)

La différence entre ces deux gaz est flagrante: alors que le méthane a pratiquement disparu dans l'atmosphère au bout d'une cinquantaine d'année, il reste encore environ 40% de dioxyde de carbone plus de 100 ans après son émission, et ce taux est pratiquement stable ensuite. La stratégie pour arriver à une neutralité carbone en 2050 est ainsi complètement différente selon la nature du gaz considéré.

La concentration moyenne de dioxyde de carbone dans l'atmosphère est actuellement d'environ 500 ppm, soit 500 « parties par million », c'est-à-dire 500 molécules de CO_2 par million de molécules d' « air », essentiellement des molécules de di-azote (N_2, environ 80%) ou de di-oxygène (O_2, environ 20%). La figure 2 indique l'évolution de cette concentration en fonction du temps, depuis environ 2.000 ans[1].

Cette concentration a été très stable pendant environ 1900 ans, puis s'accélère très rapidement. La stabilité de la concentration résulte de l'équilibre entre les émissions de dioxyde de carbone dans l'atmosphère et leur absorption naturelle par les océans et la végétation terrestre. Cet équilibre a été rompu depuis le début du XXème siècle. Le surplus d'émission par rapport à la capacité d'absorption de la nature reste ainsi piégé dans l'atmosphère.

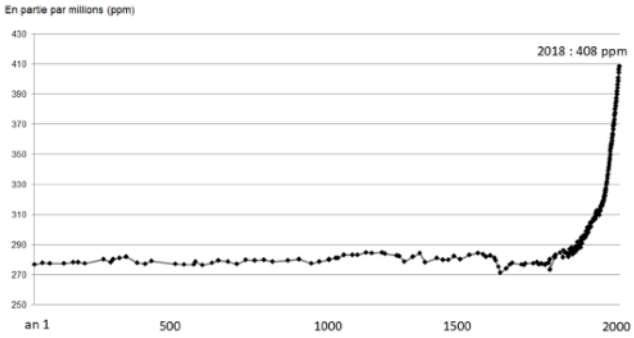


Figure 2: Évolution de la concentration moyenne de dioxyde de carbone dans l'atmosphère depuis 2000 ans.

Emissions globales dans le monde

Pour comprendre exactement quels sont les leviers d'action pour réduire le taux d'émission des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, il convient de comparer ce taux d'émission en France à celui d'autres pays. Nous avons choisi de nous concentrer sur nos plus proches voisins de l'Union Européenne, l'Union Européenne en entier, les USA, la Chine et l'Inde. Le tableau 1 rassemble ces données. Elles sont largement arrondies pour se concentrer sur les grandes tendances.

France	*Espagne*	*Italie*	*Allemagne*	*Benelux*	*UE*	*USA*	*Chine*	*Inde*
380	280	370	680	260	3600	6000	15000	4000

Tableau 1: taux d'émission total de gaz à effet de serre dans différents pays en 2023. Les données sont en Mt CO_2 eq .

Pour avoir des entités pas trop petites, nous avons rassemblé les données du Luxembourg, de la Belgique et des Pays-bas sous l'appellation Benelux. Il est clair que la Chine est le pays le plus émetteur de dioxyde de carbone, suivi par les USA avec un taux d'émission typiquement deux fois plus faible, et l'Europe avec un taux presque quatre fois plus faible.

Au delà de la valeur total d'émission de gaz à effet de serre par un pays, il est intéressant de mesurer quels sont les efforts à faire pour réduire rapidement ce taux d'émission. Pour cela, il est traditionnel de calculer le taux annuel d'émission de gaz à effet de serre par habitant. Ce taux est indiqué sur la figure 3 pour l'année 2023. Pour un niveau de vie similaire en Europe et aux USA, ceux-ci ont un mode de consommation d'énergie particulièrement dispendieux en gaz à effet de serre, avec un taux par habitant plus de deux fois plus élevé qu'en Europe.

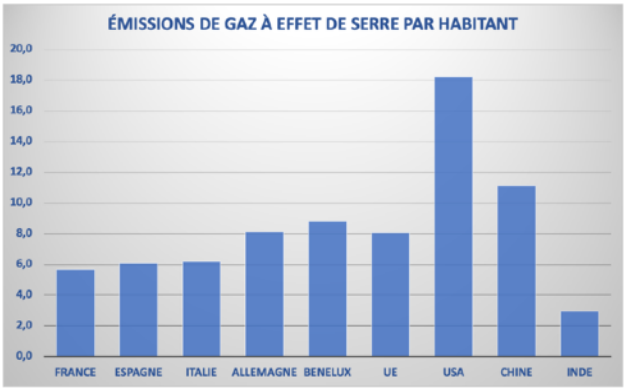


Figure 3: émissions annuelles de gaz à effet de serre par habitant en 2023, exprimées en tonnes de CO_2 eq par habitant.

Au sein de l'Union européenne, et en se concentrant plus particulièrement sur nos plus proches voisins, l'Allemagne et le Benelux sont les pays les plus émetteurs par habitant, avec un taux 50 % plus élevé qu'en France. Le fort taux d'émission total de la Chine est en fait dû à sa très grande population, le taux par habitant étant juste 30% plus élevé que

[1] voir le site internet : www.notre-environnement.gouv.fr

celui de l'Allemagne par exemple, et 40% moins élevé que celui des USA. Le taux d'émission par habitant de l'Inde est particulièrement faible.

Comment analyser ces données ?

Si l'on se concentre sur le dioxyde de carbone, sa concentration dans l'atmosphère est ainsi directement liée à l'accumulation de ce gaz dans l'atmosphère depuis typiquement une centaine d'années. Les simulations numériques indispensables pour comprendre les changements climatiques que nous observons année après année doivent donc gérer deux échelles d'espace et de temps très différentes. Il s'agit d'une part de l'échelle globale liée à l'accumulation de dioxyde de carbone dans l'atmosphère pendant une centaine d'année et sa dissémination sur tout le globe au fils des ans. Comprendre l'influence des sources d'émission terrestre à plus court terme, en fonction de l'environnement local – urbain ou rural – nécessite d'autre part de savoir traiter l'échelle locale liée à l'émission annuelle de ce gaz lors des activités humaines.

Ces deux échelles de temps et d'espace très différentes correspondent à des données aussi très différentes. L'accumulation du dioxyde de carbone dans l'atmosphère, par exemple, va dépendre du taux d'émission de chaque pays depuis typiquement 1920. La figure 4 indique celui-ci pour différents pays, entre 1970 et 2019. Le terme UE à 27 représente tous les pays qui font actuellement partie de l'Union Européenne.

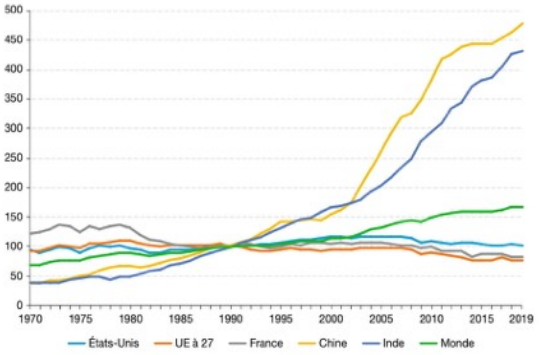


Figure 4: taux d'émission de dioxyde de carbone entre 1970 et 2019, pour certains pays. Ce taux est normalisé à 100 en 1990.

A partir de cette figure[1], et des valeurs absolues des émissions de ces pays en 1990, il est possible de calculer le taux d'émission cumulé entre 1970 et 2019, soit une cinquantaine d'année. Entre 1920 et 1970, il est raisonnable de supposer que le taux d'émission reste relativement constant, comme cela est déjà le cas au début des années 70, pour les pays qui font actuellement partie de Union Européenne et les USA, et très légèrement croissant pour la Chine et l'Inde. Il est alors facile d'estimer les ordres de grandeur des émissions cumulées de ces grands ensembles de population durant les cent dernières années. Elles sont indiquées dans le tableau 2.

Chine	*Inde*	*USA*	*UE à 27*
250	50	450	350

Tableau 2: estimation des émissions cumulées de CO_2 dans le monde entre 1920 et 2019, exprimées en milliards de tonnes.

Les principaux pays occidentaux, USA et Union Européenne, ont donc émis durant les cent dernières années environ trois fois plus de dioxyde de carbone que la Chine. Ce sont ces émissions cumulées qui sont au cœur de l'augmentation de la température moyenne de l'atmosphère terrestre que nous connaissons actuellement. Il est instructif[2] de noter qu'en dépit de la très forte augmentation, en pourcentage, des émissions de l'Inde entre 1990 et 2019, comme on peut le voir sur la figure 4, le cumul des émissions de ce pays sur cent ans est particulièrement faible.

Au niveau de la source même d'émission de dioxyde de carbone par l'activité humaine, au niveau local, il faut par contre plutôt considérer le taux d'émission par unité de surface, et donc par exemple par kilomètre carré. C'est précisément cette donnée qui doit servir de condition initiale pour toutes les modélisations de l'évolution à court et moyen terme de la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Nous avons indiqué cette donnée sur la figure 5 pour les mêmes pays considérés précédemment.

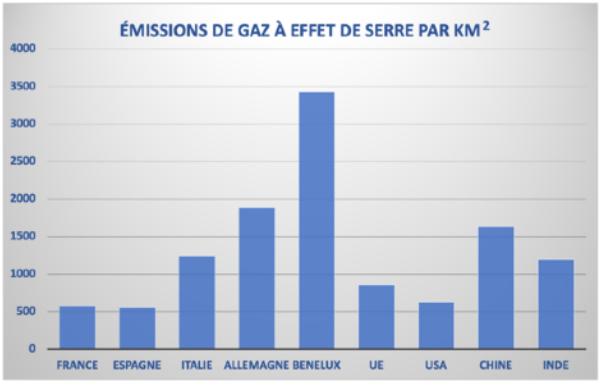


Figure 5: émissions annuelles de gaz à effet de serre en 2023, exprimées en tonnes de CO_2 eq par kilomètre carré.

Ces données sont particulièrement instructives, et permettent d'avoir une vision très différente de celle que l'on peut avoir au vu des données précédentes. La France et l'Espagne restent les très bons élèves de

[1] voir le site internet: statistiques.developpement-durable.gouv.fr
[2] voir page 17

la classe, mais ils sont aussi rejoints par les USA. L'Union Européenne dans son ensemble a un taux légèrement supérieur, d'environ 40%. L'Italie a un taux deux fois plus élevé que la France, au même niveau que l'Inde. Enfin, parmi nos proches voisins, l'Allemagne a un taux d'environ trois fois plus élevé que la France, et le Benelux de six fois supérieur. Compte tenu de sa superficie relativement faible par rapport à sa population, le taux d'émission de l'Inde est ici bien supérieur à celui de l'Europe. Le taux d'émission de la Chine est quant-à-lui deux fois plus élevé que celui de la communauté Européenne.

Ces taux d'émission par unité de surface au niveau de l'activité humaine sur terre, moyennées sur un pays entier, vont ensuite bien évidemment évoluer dans l'atmosphère, au gré du mouvement des grandes masses d'air. Il n'en reste pas moins que ces « bouffées » d'émission de dioxyde de carbone sont loin d'être anodines pour toutes les modélisations locales du climat en Europe. Le taux de réchauffement climatique en Europe est par exemple environ deux fois supérieur à la moyenne mondiale, et ceci depuis plus de 40 ans, selon l'Organisation Météorologique Mondiale[1].

Comment diminuer la concentration de dioxyde de carbone dans l'atmosphère ?

Le dioxyde de carbone peut être absorbé par des processus naturels, on parle alors de puits de carbone. Il y en a deux principaux: celui provenant de la croissance des végétaux par photosynthèse (réservoir terrestre) et celui provenant de l'interaction océan-atmosphère (réservoir océanique). Le bilan au niveau mondial de ces différents processus[2] est indiqué sur la figure 6. Le changement d'usage des sols correspond au bilan au niveau de l'émission de dioxyde de carbone entre d'une part la végétalisation de nouveaux espaces qui permet d'absorber plus de CO_2 et d'autre part la destruction d'espaces verts, comme la déforestation par exemple, qui en détruit.

En France, le bilan des réservoirs terrestres est de l'ordre de -20 Mt CO_2 en 2023 pour un total d'émission de 290 Mt CO_2 , hors émissions de méthane et de protoxyde d'azote. L'objectif affiché par l'Union Européenne est d'arriver à une neutralité carbone d'ici 2050, c'est-à-dire à un bilan nul entre émission et absorption de gaz à effet de serre en Europe.

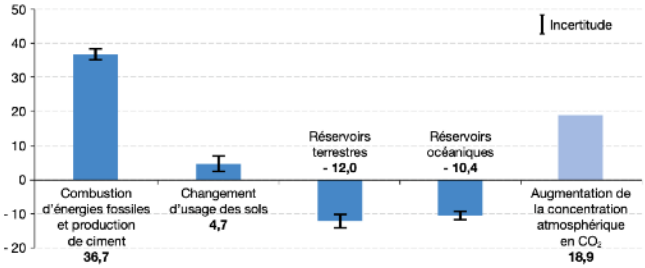


Figure 6: bilan global au niveau mondial de l'émission et de la captation de CO_2 en moyenne annuelle sur la période 2021-2022. Les données sont en milliards de tonnes de CO_2.

Comme déjà indiqué dans le chapitre sur la production d'électricité, la France a exporté en 2023 50 TWh d'électricité vers ses pays voisins. Ces exportations ne sont pas concentrées sur les périodes de pic de consommation, typiquement en fin de journée pendant l'hivers, et donc permettent à ces pays de moins utiliser leurs centrales thermiques, à gaz et à charbon, en utilisant l'électricité décarbonée produite en France. Si l'on prend une production moyenne par ces centrales[3] de 700 kg de CO_2 par MWh, cela correspond à 0,7 Millions de tonnes de CO_2 économisées par TWh exporté. Les exportations françaises d'électricité ont ainsi permis une réduction de l'ordre de 35 Mt CO_2 par nos pays voisins. Cette économie devrait être mise au crédit de la France au même titre que les puits de carbone.

Emissions de dioxyde de carbone en France

Le détail des sources d'émission de dioxyde de carbone en France est indiqué sur la figure 7, pour un total de 290 *Mt CO_2* en 2023. Le domaine des transports est largement prépondérant, suivi par l'industrie et le domaine résidentiel et tertiaire. Celui de la production d'énergie (industrie de l'énergie) n'est concerné que par le fonctionnement des centrales à gaz. Sa contribution à l'émission de CO_2 est de l'ordre de 10 %. Pour comparaison, le taux d'émission annuel de gaz à effet de serre en Allemagne est d'environ 620 *Mt CO_2* en 2023. Le domaine de l'agriculture et des déchets ne produit que peu de dioxyde de carbone.

Il est intéressant de calculer la quantité de dioxyde de carbone émise par unité d'énergie consommée, hors électricité, pour chacune de ces activités. A partir des figures 2 des pages 36 et 38, il est en effet facile d'extraire cette quantité. On obtient alors le tableau 3.

[1] voir le site internet (en anglais) : wmo.int/fr/node/21479
[2] voir le site internet : www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr
[3] voir page 47

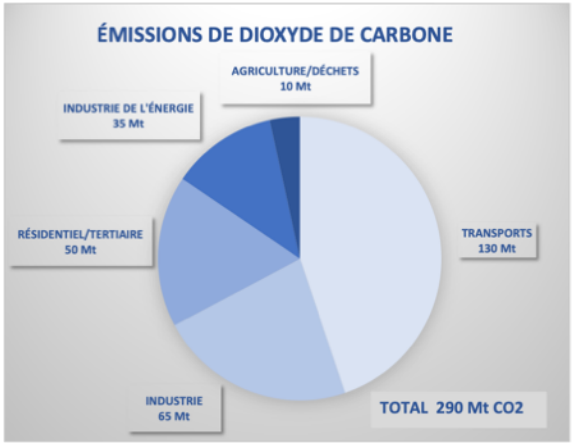


Figure 7: émissions annuelles de dioxyde de carbone en France en 2023, en millions de tonnes de C02.

Ce taux d'émission de dioxyde de carbone par unité d'énergie consommée, hors électricité, pourrait d'ailleurs constituer un indicateur des priorités pour toutes les actions de réduction de nos émissions de gaz à effet de serre. Le domaine de l'industrie devrait être prioritaire, suivi immédiatement par celui des transports, et en dernier lieu celui du domaine résidentiel et tertiaire, essentiellement le chauffage au gaz et au fuel.

Résidentiel Tertiaire	*Industrie*	*Transports*
0,15	0,35	0,25

Tableau 3: émissions de CO_2 par activités et par unité d'énergie consommée en 2023, hors électricité, exprimées en millions de tonnes de CO_2/TWh.

Émissions de méthane en France

Les émissions de méthane en France sont essentiellement dues aux activités agricoles et au traitement des déchets. Il peut aussi être émis lors de l'extraction de pétrole, de gaz ou de charbon ou dans une moindre mesure dans le domaine résidentiel et tertiaire. Les taux d'émission en France sont indiquées dans le tableau 4 en 2023, en 1990 (date de référence prise pour évaluer les évolutions des émissions de gaz à effet de serre en Europe) et en 1973 soit 50 ans en arrière.

	2023	*1990*	*1973*
Agriculture	40	50	
Traitement des déchets	15	15	
Autres	5	15	
Total	60	80	85

Tableau 4: émissions de méthane pour différentes années, selon les sources de production, mesurées en millions de tonnes de CO_2 eq.

Les émissions de méthane dans le domaine de l'agriculture sont en constante diminution depuis une quarantaine d'année. Cela devrait continuer dans les années à venir, notamment avec la diminution progressive de la consommation de viande bovine en France. Les émissions dans le domaine du traitement des déchets sont par contre constantes depuis 1990. Cela devrait par contre évoluer très rapidement avec la mise en place de centres de méthanisation pour valoriser ces émissions et les utiliser pour produire de l'électricité ou de la chaleur[1].

Dans ces conditions, et compte tenu de l'évolution du taux de méthane dans l'atmosphère en fonction du temps, comme indiqué sur la figure 1, on peut estimer que la concentration de méthane dans l'atmosphère n'évolue pratiquement plus en France, voir diminue légèrement. En d'autres termes, la neutralité carbone est d'ores et déjà réalisée pour ce gaz à effet de serre en France.

[1] voir le site internet : methafrance.fr

FICHES TECHNIQUES

La classification des sources d'électricité est souvent faite en termes d'énergies renouvelables ou non-renouvelables. Si cette classification est légitime pour mettre en évidence la nécessité de préserver les ressources naturelles de notre planète, elle ne dit rien sur leur capacité à assurer une alimentation en continu de nos besoins et donc sur leur capacité à réduire nos émissions de gaz à effet de serre pour un service rendu à la collectivité donné.

Les fiches techniques présentées ici sont rassemblées plutôt en terme de fortes ou faibles émissions de gaz à effet de serre ainsi que de leur capacité à assurer un tel service. Elles sont volontairement simplifiées, et les données choisies largement arrondies, afin de se concentrer sur la *raison d'être des choses* plutôt que sur la valeur à l'unité près de toutes les données que l'on peut trouver par ailleurs sur internet.

Sources d'électricité à fort taux d'émission de gaz à effet de serre

Sources d'électricité à faible taux d'émission de gaz à effet de serre

La filière hydrogène

Batteries

Les données concernant les sources d'électricité sont disponibles sur internet, parfois jusqu'à la virgule près. Celles rassemblées ici sont volontairement succinctes, et largement arrondies, pour se concentrer sur les ordres de grandeur les plus significatifs. Les unités de puissance et d'énergie utilisées sont expliquées en page 35.



Sources d'électricité à fort taux d'émission de gaz à effet de serre

Ces sources d'électricité correspondent essentiellement en France aux centrales thermiques à gaz. La production actuelle des centrales à charbon ou au fuel encore en fonctionnement en France est complètement négligeable. Ce n'est cependant pas le cas dans beaucoup d'autres pays, et notamment en Allemagne.

Centrales thermiques à gaz

Type de production

Production non-renouvelable, pouvant fonctionner quasiment en continu avec la possibilité de moduler la production d'électricité de façon souple. On parle alors de source d'électricité pilotable. La modulation de la production d'électricité peut être relativement rapide, ce qui permet à ce type de centrale de palier aux fluctuations rapides de la consommation ou de la production d'électricité.

Unité de production typique

La puissance des unités de production varie de 400 MW à 600 MW. Il y en a actuellement une quinzaine en fonctionnement en France. Les centrales modernes sont dites à cycle combiné, avec un rendement de 50 % plutôt que 35 % pour une centrale standard. Elles peuvent aussi fonctionner en cogénération, en récupérant la chaleur perdue par la centrale pour l'utiliser dans des réseaux de chaleur situés à proximité, pour un rendement total de 85 % environ.

Disponibilité

La disponibilité de ces centrales est très grande. Elles ne fonctionnent cependant pas à plein régime et s'adaptent à la demande de puissance à injecter dans le réseau national pour couvrir les besoins qui ne peuvent l'être par les sources d'électricité à faible taux d'émission de gaz à effet de serre.

Puissance installée - électricité produite

La puissance installée est d'environ 15 GW. La quantité d'électricité produite en 2023 est de 30 TWh, soit une utilisation moyenne de ces centrales de 25 %.

Émissions de CO_2

Le coût en terme d'émissions de gaz à effet de serre est estimé à 400 Kg de CO_2/MWh. Il correspond essentiellement au coût de son fonctionnement. Pour comparaison, le coût correspondant pour une centrale à charbon est d'environ 1.000 Kg de CO_2/MWh.



Sources d'électricité à faible taux d'émission de gaz à effet de serre

La première centrale nucléaire a été raccordée au réseau national en 1963. La première centrale nucléaire fermée est celle de Fessenheim, en 2020, après plus de 40 années de fonctionnement.

Centrales nucléaires

Type de production

Production non-renouvelable, pouvant fonctionner quasiment en continu, hors périodes de maintenance et de réparations, avec la possibilité de moduler la production d'électricité. Cette modulation ne peut se faire par contre de façon très rapide pour des raisons de sécurité.

Unité de production typique

La puissance de chaque réacteur nucléaire a augmenté au fur et à mesure de leur installation. Il y a actuellement 32 réacteurs de 900 MW, 20 de 1300 MW et 4 plus récents de 1450 MW. Le réacteur de nouvelle génération EPR qui vient d'être couplé au réseau à Flamanville est d'une puissance de 1600 MW. Des projets de petits réacteurs nucléaires modulaires (*SMR*), d'une puissance de 10 MW à 300 MW sont à l'étude dans le monde entier.

Disponibilité

Chaque unité de production doit être arrêtée pour maintenance et rechargement du combustible pendant environ un mois tous les 12 à 18 mois, soit une disponibilité maximale de 80%. Compte-tenu des différents arrêts dûs à des contrôles et des réparations, la disponibilité réelle du parc de centrales nucléaires en 2023 a été de 65%.

Puissance installée - électricité produite

La puissance installée est d'environ 60 GW. L'électricité produite en 2023 est d'environ 320 TWh, ce qui correspond à une utilisation moyenne des centrales nucléaires disponibles de 90%.

Émissions de CO_2

Le coût en terme d'émissions de gaz à effet de serre est estimé à 6 Kg de CO_2/MWh. Il correspond essentiellement au coût de la construction du réacteur, sans émissions significatives au niveau de son fonctionnement.

Les sites possibles pour l'installation de centrales hydrauliques en France sont pratiquement tous équipés, certains avec la possibilité de pomper l'eau d'une réserve inférieure pour la remettre dans la réserve supérieure (centrales dites STEP, Station de Transfert d'Énergie par Pompage). Cela participe ainsi au stockage de l'électricité en cas de surplus de la production par rapport à la consommation.

Centrales hydrauliques

Type de production

Production renouvelable, pouvant fonctionner quasiment en continu avec la possibilité de moduler la production d'électricité de façon très souple. La modulation de la production peut se faire de façon extrêmement rapide, ce qui permet à ce type de centrale de palier à toutes les fluctuations rapides de la consommation ou à celles de la production des sources d'électricité intermittentes.

Unité de production typique

La puissance des unités de production est extrêmement variable, de quelques MW seulement pour les micro-centrales jusqu'à 1800 MW pour la plus grande centrale à Grand'Maison en Isère. Il y a environ 2000 micro-centrales de moins de 10 MW, une centaine de taille moyenne entre 50 MW et 600 MW, et quatre de plus de 700 MW.

Disponibilité

La disponibilité de ces centrales est très grande. Hormis les micro-centrales, elles ne fonctionnent cependant pas à plein régime et s'adaptent en permanence à la demande de puissance à injecter dans le réseau national pour couvrir les besoins qui ne peuvent l'être par les centrales nucléaires ou les parcs d'éoliennes et de panneaux photovoltaïques.

Puissance installée - électricité produite

La puissance totale installée en 2023 est d'environ 25 GW. La quantité d'électricité produite est de 60 TWh environ, soit une utilisation moyenne sur l'année d'environ 25%.

Émissions de CO_2

Le coût en terme d'émissions de gaz à effet de serre est estimé à 6 Kg de CO_2/MWh. Il correspond essentiellement au coût de la construction de la centrale.

Les parcs d'éoliennes sont, avec les parcs de panneaux photovoltaïques, les sources d'électricité renouvelables les plus développées en France, avec un taux de croissance très grand. Leur utilisation doit cependant être bien pensé pour pouvoir s'adapter au caractère intermittent de leur production d'électricité.

Éoliennes

Type de production

Production renouvelable, fonctionnant de façon intermittente selon la vitesse du vent au niveau de leur installation.

Unité de production typique

Les parcs d'éoliennes sont installés soit sur terre, soit en mer (éolien dit offshore). Les installations terrestres sont constituées typiquement de 10 éoliennes de 3 MW chacune, soit une puissance de 30 MW par parc. Les installations offshores sont bien plus grandes. Pour ces installations, les éoliennes peuvent être soit posées sur le fond de la mer, soit flottantes. Quatre parcs d'éoliennes offshores posées de 500 MW chacun environ sont en service en France en 2025, en Manche et en Atlantique, avec des éoliennes d'une puissance de 6 à 8 MW. Deux parcs pilotes d'éoliennes offshore flottantes de 25 et 30 MW sont opérationnels dans le golfe du Lion et en Méditerranée, avec des éoliennes de 10MW.

Disponibilité

La disponibilité de ces parcs d'éoliennes pour produire de l'électricité est très grande. Compte-tenu des périodes de maintenance des pièces mécaniques de l'éolienne, on pourra l'estimer à 90%.

Puissance installée - électricité produite

La puissance totale installée en 2023 est de 25 GW. La quantité d'électricité produite cette même année est de 50 TWh environ, ce qui définit un facteur de charge de 25 %. Le facteur de charge est le rapport entre la quantité d'électricité effectivement produite pendant un an et celle théoriquement produite si les éoliennes avaient fonctionné à pleine puissance toute l'année. Le facteur de charge pour un champ d'éoliennes offshores est bien plus élevé, de l'ordre de 45 à 50% selon qu'il est posé ou flottant, en raison d'un vent plus régulier et soutenu.

Émissions de CO_2

Le coût en terme d'émissions de gaz à effet de serre est estimé à 15 Kg de CO_2/MWh pour un parc d'éoliennes offshore. Il est aussi essentiellement constitué du coût au niveau de la construction.

Panneaux photovoltaïques

Type de production

Production renouvelable, fonctionnant de façon intermittente selon la luminosité du lieu de leur installation.

Unité de production typique

Le type d'installation des panneaux photovoltaïques a évolué très rapidement ces dernières années. D'une utilisation individuelle sur les toits de maisons, il est maintenant prévu sur des surfaces beaucoup plus grandes, sur grandes toitures ou au sol. Une grande installation au sol représente typiquement une surface de 10 ha pour une puissance installée de 12 MW. La plus grande centrale photovoltaïque est actuellement à Cestas, près de Bordeaux et correspond à un parc de panneaux d'une puissance totale de 300 MW. Cette puissance correspond à une production annuelle estimée de 350 GWh.

Disponibilité

La disponibilité de ces parcs d'éoliennes est très grande. En l'absence de pièces mécaniques dans les panneaux photovoltaïques, leur disponibilité peut-être considérée de l'ordre de 100%.

Puissance installée - électricité produite

La puissance totale installée en 2023 est d'environ 20 GW. La quantité d'électricité produite cette même année est de 25 TWh environ, ce qui définit un facteur de charge moyen de 15 %. Ce facteur de charge dépend évidemment beaucoup de l'ensoleillement des panneaux et de leur orientation par rapport au soleil. Une puissance installée de 1 MW produira par exemple environ 900 MWh/an dans le nord de la France (soit un facteur de charge de 10%), et 1400 MWh/an dans le sud (facteur de charge de 15%).

Émissions de CO_2

Le coût en terme d'émissions de gaz à effet de serre est estimé à 40 Kg de CO_2/MWh. Il correspond essentiellement au coût de fabrication des cellules photovoltaïques.

Les centrales à biomasse ont une place à part dans la production d'électricité en France. La puissance installée est actuellement relativement faible, avec des centrales de petite taille qui doivent être installées préférentiellement à proximité de lieux de vie pour pouvoir se raccorder à des réseaux de chaleur et fonctionner ainsi en cogénération. Il convient par contre de n'utiliser comme combustible que des déchets végétaux ou ménagers pour ne pas empiéter sur la production agricole nécessaire pour la consommation humaine.

Centrales à biomasse

Type de production

Ces centrales thermiques peuvent fonctionner quasiment en continu, sur le même principe que les centrales à gaz. Elles utilisent des combustibles variés, comme le bois, les végétaux, les déchets agricoles ou les ordures ménagères.

Unité de production typique

La puissance des unités de production est très variable, de 5 MW à 150 MW pour la plus grande centrale à Gardanne. Il y a actuellement une centaine de centrales réparties sur tout le territoire. Elles peuvent fonctionner facilement en cogénération, en récupérant la chaleur perdue par la centrale pour l'utiliser dans des réseaux de chaleur.

Disponibilité

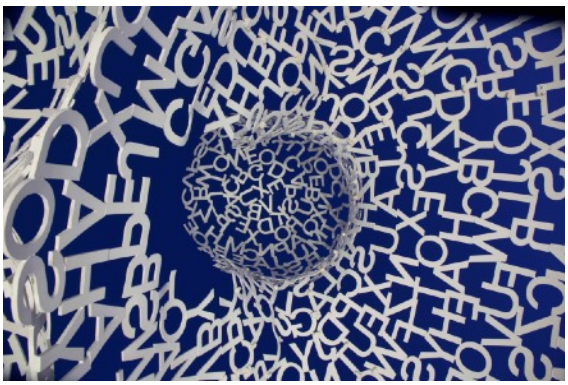
La disponibilité de ces centrales dépend beaucoup de son type de fonctionnement et de son approvisionnement en combustible.

Puissance installée - électricité produite

La puissance totale installée est actuellement relativement faible, d'environ 2 GW. La quantité d'électricité produite annuellement est d'environ 10 TWh pour ce qui concerne la seule production d'électricité, soit une utilisation moyenne sur l'année de 50%. Pratiquement autant d'énergie peut être récupéré sous forme de chaleur.

Émissions de CO_2

Le coût au niveau de l'émission de gaz à effet de serre est faible dans la mesure ou le dioxyde de carbone dégagé par la combustion est compensé par celui absorbé par les végétaux lors de leur croissance.



La filière hydrogène

On entend par filière hydrogène tous les processus industriels nécessaires pour produire de l'hydrogène, et l'utiliser ensuite comme source d'énergie pour produire de l'électricité. Le développement de cette filière à grande, voire très grande échelle, au niveau français et européen est un enjeu majeur dans les années à venir pour arriver à la neutralité carbone demandée par l'Union Européenne d'ici 2050.

Il est assez surprenant de constater que les solutions actuellement envisagées pour répondre à ce défi dans des domaines aussi variés que l'industrie, le logement ou le transport, reposent pratiquement toutes sur l'utilisation d'hydrogène comme source d'énergie. C'est le cas par exemple dans l'industrie par le remplacement du gaz naturel par de l'hydrogène, pour le chauffage par le remplacement des chaudières à gaz de toute taille par des chaudières à hydrogène, ou encore par le remplacement de tous les moyens de locomotion gourmands en produits pétroliers (TER, camions, bus, ou même berlines et SUV) par des modèles équipés de moteurs électriques alimentés par des piles à combustibles fonctionnant à l'hydrogène.

La production d'hydrogène

L'hydrogène utilisé actuellement pour les besoins de l'industrie est fabriqué à partir de gaz naturel par le processus dit de « vaporeformage ». Le bilan net de ce processus est effectivement la production de molécules de dihydrogène H_2 … en même temps que des molécules de dioxyde de carbone ! Ce processus n'est évidemment pas le bon pour produire de l'hydrogène sans émettre de gaz à effet de serre.

La production de l'hydrogène utilisé dans la filière hydrogène repose quant-à-lui sur le processus d'électrolyse de l'eau. On parle alors de production d'hydrogène « vert ». Le principe est extrêmement simple: il suffit de « casser » les molécules d'eau H_2O sous l'action d'un courant électrique pour produire des molécules de dioxygène O_2 et de dihydrogène H_2 . Au niveau industriel, plusieurs processus font actuellement l'objet de programmes de Recherche et Développement (R&D) extrêmement ambitieux pour augmenter leur rendement et baisser leur coût de production. Deux sont plus particulièrement adaptés pour un fonctionnement intermittent:

- *L'électrolyse dite PEM (Proton Exchange Membrane)*. Ce processus nécessite du platine – métal qui est cher et relativement rare – pour optimiser la production d'hydrogène. Il fonctionne à des températures inférieures à 200°, pour un rendement de 70 % environ. Ce rendement mesure la proportion d'énergie chimique stockée dans l'hydrogène - et que l'on peut récupérer par combustion de l'hydrogène - par rapport à l'énergie électrique fournie pour le produire.
- *L'électrolyse à haute température SOEC (Solid Oxide Electrolysis Cell)*. Ce processus évite l'usage du platine, mais nécessite des températures supérieures typiquement à 800° pour un rendement proche de 90 %.

Des gisements naturels d'hydrogène ont été également découverts récemment, notamment dans l'est de la France. Les quantités d'hydrogène susceptibles d'être extraites sont ici énormes. On parle alors d'hydrogène « blanc ».

Les piles à combustible

Les piles à combustible sont d'une certaine manière le processus inverse de l'électrolyse de l'eau: à partir de l'hydrogène fabriqué par électrolyse de l'eau, et de l'oxygène présent dans l'atmosphère, les piles à combustible produisent de l'électricité en rejetant tout simplement de l'eau.

Il existe six types de piles à combustible, aux acronymes barbares de AFC, PEMFC, DMFC ou encore PAFC, MCFC, SOFC. Les trois premières fonctionnent à des températures inférieures à 200°, pour des puissances électriques de 10 à 100 kW. Elles sont donc particulièrement adaptées à des utilisations dans les transports. Les trois autres fonctionnent à haute température, supérieures à 200°, pour des puissances pouvant aller jusqu'à plusieurs méga-watts. Elle peuvent alors servir pour des installations fixes de production d'électricité.

La mise au point d'électrolyseurs et de piles à combustible – pour un coût de production d'électricité et un rendement raisonnable – est un enjeu majeur pour le développement de la filière hydrogène à grande échelle.

Le stockage de l'hydrogène

Une fois l'hydrogène produit par électrolyse de l'eau, et afin de pouvoir l'utiliser dans des piles à combustible embarquées dans différents véhicules, il faut savoir l'acheminer si nécessaire et le stocker. L'acheminement de l'hydrogène sur de grandes distances se fait dans des pipelines, de la même façon que le gaz naturel. Un projet de pipeline reliant le Portugal, l'Espagne et la France – dénommé H2med – vient d'ailleurs d'être lancé, en connexion avec des réseaux déjà existants en France.

Le stockage de l'hydrogène pour une utilisation comme carburant d'une pile à combustible, lorsque celle-ci est embarquée sur un train, camion, bus ou voiture particulière, peut se faire sous forme gazeux à haute pression (de 300 à 700 bars). Il concerne à la fois les stations de distribution et les réservoirs embarqués.

Il n'est pas encore possible, pour tout un chacun, de pouvoir recharger son réservoir à la station « d'hydrogène » la plus proche. C'est bien le défi à relever d'ici 2035 lorsque la vente de voitures neuves à essence sera réglementée en Europe. Mais il est encourageant de noter que l'utilisation de piles à combustible, alimentées à l'hydrogène et couplées à un moteur électrique, se développe extrêmement rapidement dans le domaine des transports. Des trains TER fonctionnent d'ores et déjà à l'hydrogène, ainsi que des bus urbains. Dans ces situations, la recharge des réservoirs d'hydrogène se fait naturellement au niveau des dépôts de train et de bus et ne nécessite donc pas des stations de recharge délocalisées sur tout le territoire. Mais l'utilisation de voitures particulières fonctionnant à l'hydrogène commence aussi à se développer. Des constructeurs automobiles en proposent déjà à leur catalogue. La région Auvergne-Rhône-Alpes à même utilisé, pour sa caravane de suivi des étapes du Tour de France 2022 dans la région, des voitures à hydrogène.

Scénario pour le futur

Au vu du développement rapide de la filière hydrogène en France, ainsi que des défis qu'il reste à relever pour qu'elle puisse s'implanter à grande échelle sur tout le territoire français, il est facile d'imaginer un scénario réaliste pour le futur.

- Le remplacement progressif des TER fonctionnant actuellement au diesel par des TER alimentés en hydrogène est déjà "en route". Il pourrait se généraliser rapidement, avec des stations de production d'hydrogène au niveau des dépôts de train.
- Le remplacement des lignes de bus urbains actuels par des bus fonctionnant à l'hydrogène devrait progressivement se développer à un coût raisonnable, avec des stations de production d'hydrogène ou de recharge au niveau des dépôts de bus.
- L'extension de ce programme d'équipement en véhicules propres pourra se faire ensuite avec l'équipement progressif des camions ou des bus touristiques et des voitures individuelles, berlines ou SUV. Cela nécessitera bien entendu l'extension des stations de recharge sur l'ensemble du territoire Français.

Ces développements ambitieux impliquent en amont une politique tout aussi ambitieuse de production d'hydrogène vert. La France est probablement l'un des rares pays en Europe, avec la Suède, a pouvoir assurer cette production sans émissions supplémentaires de dioxyde de carbone. En effet, comme l'alimentation de base en électricité en France[1] est assuré par les centrales nucléaires, une grande partie de la production électrique des parcs d'éoliennes ou de panneaux photovoltaïque pourra être dédiée dans le futur à la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau, sans émettre aucun gaz à effet de serre supplémentaire pour assurer l'alimentation en électricité du pays.

Ce n'est par exemple pas le cas en Allemagne[2] ou l'alimentation de base en électricité est assurée par des centrales à gaz ou à charbon. L'utilisation d'éoliennes ou de panneaux photovoltaïques pour produire de l'hydrogène vert et non plus pour participer à l'alimentation de base en électricité du pays devra alors être compensée obligatoirement par un surplus de fonctionnement de ces centrales à gaz ou à charbon, et donc un surplus d'émissions de dioxyde de carbone.

La production d'hydrogène, et son stockage avant utilisation, permet ainsi d'optimiser au maximum l'utilisation des sources de production d'électricité, quelles quelles soient. Les parcs de panneaux photovoltaïques - pendant la journée - ou les parcs d'éoliennes - quand il y a du vent - peuvent ainsi être utilisés en priorité pour la production d'hydrogène, avec les centrales nucléaires pendant les périodes de plus faible consommation, comme la nuit ou les week-ends. Et les centrales thermiques au gaz, ainsi que les centrales hydrauliques n'auront pas à palier, au pied levé, les fluctuations rapides de production d'électricité de ces parcs.

[1] voir page 35
[2] voir page 23



Batteries

Les moteurs des voitures électriques sont alimentés actuellement pratiquement uniquement par une batterie. Compte tenu du développement extrêmement rapide des voitures électriques en France et en Europe – le nombre de voitures électriques neuves est maintenant plus grand que celui de voitures diesel – il est essentiel de bien comprendre les contraintes liées à l'utilisation des batteries utilisées.

Les piles, premières batteries grand public

La première des batteries que nous utilisons quasiment tous les jours, et depuis bien longtemps déjà, est tout simplement la pile que nous avons dans toutes nos télécommandes, ou dans tous les jeux électroniques. Et nous en consommons plus d'un milliard par an en France. Si l'on se réfère par exemple aux piles AA les plus courantes, elles emmagasinent environ 4 Wh d'énergie chacune. Cela correspond, pour environ un milliard de piles, à une énergie totale consommée de 4 GWh par an, environ la production électrique d'un demi réacteur nucléaire.

Le service rendu par ces piles est évident. La consommation que nous en faisons individuellement est suffisamment faible pour que l'on accepte de payer un prix exorbitant l'énergie consommée. Le prix du kWh d'une pile est de l'ordre de 250 €, alors que le tarif actuel de l'électricité à nos compteurs individuels est d'environ 0,20 €/kWh ! Ce petit exercice montre bien tout l'enjeu des discussions sur la politique énergétique d'un pays. Indépendamment des nombreuses statistiques qui pullulent sur internet sur le coût de chaque source d'approvisionnement en énergie, il convient avant tout de réfléchir sur le service que nous attendons de cette source d'électricité pour couvrir nos besoins … ou nos envies.

Dans ce cadre, l'emploi de batteries en France doit être en priorité centré sur une utilisation dans les voitures électriques citadines ou compactes. Compte-tenu du prix de ces voitures qui peut être concurrentiel par rapport à une voiture à essence, et des conditions de recharge simplifiées, cela permet de s'affranchir le plus rapidement possible, et à grande échelle, de l'utilisation de voitures à essence. Cela implique évidemment de favoriser en toute première priorité le développement de points de recharge dans tous les habitats collectifs et dans toutes les entreprises, et non pas seulement dans les maisons individuelles.

De ce point de vue, le développement de bornes de recharge ultra-rapides dans les stations d'autoroute n'est certainement pas une priorité. Si il permet l'utilisation de grosses voitures électriques - pour les personnes qui ont les moyens financiers de se les offrir - il ne permet en aucun cas une diffusion à grande échelle de l'utilisation de la voiture électrique en France.

Les batteries pour voitures électriques

Chaque batterie est caractérisée par l'énergie totale qu'elle peut stocker, mesurée en kWh. Les batteries actuellement utilisées dans les voitures électriques ont une énergie pouvant varier de 20 kWh environ à 110 kWh. L'autonomie d'une voiture électrique va alors dépendre non seulement de l'énergie de la batterie embarquée, mais aussi de la puissance du moteur et bien évidemment du style de conduite de chacun, tout comme pour une voiture à essence. Cette consommation peut varier typiquement de 12 kWh/100 km à 20 kWh/100 km. L'autonomie pour une voiture citadine électrique, avec une conduite économe et une batterie de 22 kWh, sera alors de 180 km environ.

La durée de vie d'une batterie est de l'ordre d'une dizaine d'année, avec une garantie actuelle de 8 ans. Cette durée de vie dépend du nombre de cycles charge/décharge qu'elle va subir.

QUI SUIS-JE ?



Jean-François Mathiot, je suis un physicien théoricien, directeur de recherche émérite à l'Institut de Physique Nucléaire et de Physique des Particules (IN2P3) du CNRS. J'habite en Auvergne.

J'ai reçu en 2009 le prix Jean Perrin de popularisation de la science, de la Société Française de Physique.

Mes recherches ont évolué, au cours de ma carrière, de l'étude microscopique des noyaux à la compréhension de certains problèmes théoriques posés par le modèle dit « standard » de la structure la plus élémentaire de la matière.

J'ai eu aussi l'opportunité de travailler sur des modélisations théoriques dans le domaine de la santé, notamment pour l'étude de la propagation de la COVID-19 en France.

Toutes ces pages sont aussi disponibles sur internet à l'adresse eco-virus.fr

Septembre 2026