

Pourquoi l'électricité éolienne ne peut en France que faire augmenter le prix de l'électricité pour les ménages, comme c'est déjà le cas en Allemagne.

Pourquoi elle ne peut pas vraiment faire diminuer les émissions de CO₂ de notre production électrique.

Pourquoi elle ne peut pas par elle-même nous faire «sortir du nucléaire ».

Et pourquoi il ne s'agit pas dans la pratique actuelle d'une électricité vraiment renouvelable.

B.DURAND, ancien directeur de l'Ecole Nationale Supérieure de Géologie, ancien président du Comité Scientifique de l'European Association of Geoscientists and Engineers.

Rappel préalable :

Les puissances électriques s'expriment en watt (W) et en ses multiples (kW= 1000 watts, MW= 1 million de watts, GW = 1 milliard de watts). Tandis que les productions ou consommations d'électricité s'expriment en wattheure (Wh), c'est-à-dire la production ou la consommation d'une installation électrique de puissance 1 W fonctionnant constamment à cette puissance pendant une heure, et en ses multiples (kWh= 1000 Wh, MWh= 1 million de Wh= 1000 kWh, GWh = 1 milliard de Wh= 1 million de kWh, TWh = 1000 milliards de Wh = 1 milliard de kWh).

Il ne faut pas confondre, comme on le voit malheureusement si souvent dans les médias, puissance et consommation: la puissance «nominale» d'une ampoule électrique est de l'ordre de 10 à 100 watts, mais elle ne consomme pas d'électricité si elle n'est pas allumée. L'achat d'une telle ampoule, qui coûte de l'ordre de l'euro à quelques dizaines d'euros, est un investissement en capital. Sa consommation, c'est ce qui se retrouve sur notre facture d'électricité. Elle dépend de son temps de fonctionnement : une ampoule électrique de puissance 100 W consomme en une heure 100 Wh et en dix heures 1000 Wh (soit 1 kWh). En France, le kWh consommé était en 2016 facturé aux ménages environ 15 centimes d'euro toutes taxes comprises.

Une éolienne terrestre, dont le coût en investissement est d'environ 1,5 million d'euros par MW de puissance, ne produit rien quand il n'y a pas de vent.

La puissance nominale d'une installation électrique mesure donc sa capacité maximale à produire ou à consommer. C'est pourquoi on utilise souvent le terme de capacité pour désigner la puissance nominale. Mais celle-ci ne nous dit rien de sa production ou de sa consommation d'électricité.

La confusion entre la puissance d'une installation (kW) et l'énergie qu'elle produit à l'année (kWh) équivaut pour une automobile à imaginer à tort que la vitesse maximale (km/h) qu'elle peut atteindre grâce à son moteur permet d'évaluer le service qu'elle va rendre, c'est-à-dire la distance parcourue à l'année (km). Chacun comprend bien qu'une Twingo qui roule chaque jour parcourra plus de distance qu'une Ferrari qui reste au

garage. On va voir qu'il en est de même pour les éoliennes en mer, et plus généralement les éoliennes.

1-Introduction : La racine des problèmes : l'intermittence de la production électrique des éoliennes

La figure 1 montre pour deux mois successifs les variations de la puissance électrique fournie à chaque moment (équivalent pour une voiture de sa vitesse instantanée) par une centrale éolienne en mer installée en Ecosse analogue à celle qu'il est question d'installer au large de l'île d'Oléron. Cette puissance est ici exprimée en % de la **puissance maximale** (équivalent pour une voiture de la vitesse maximale que son moteur lui permet d'atteindre), dite aussi **puissance nominale**, **puissance installée** ou encore **capacité installée**, que peut fournir la centrale.

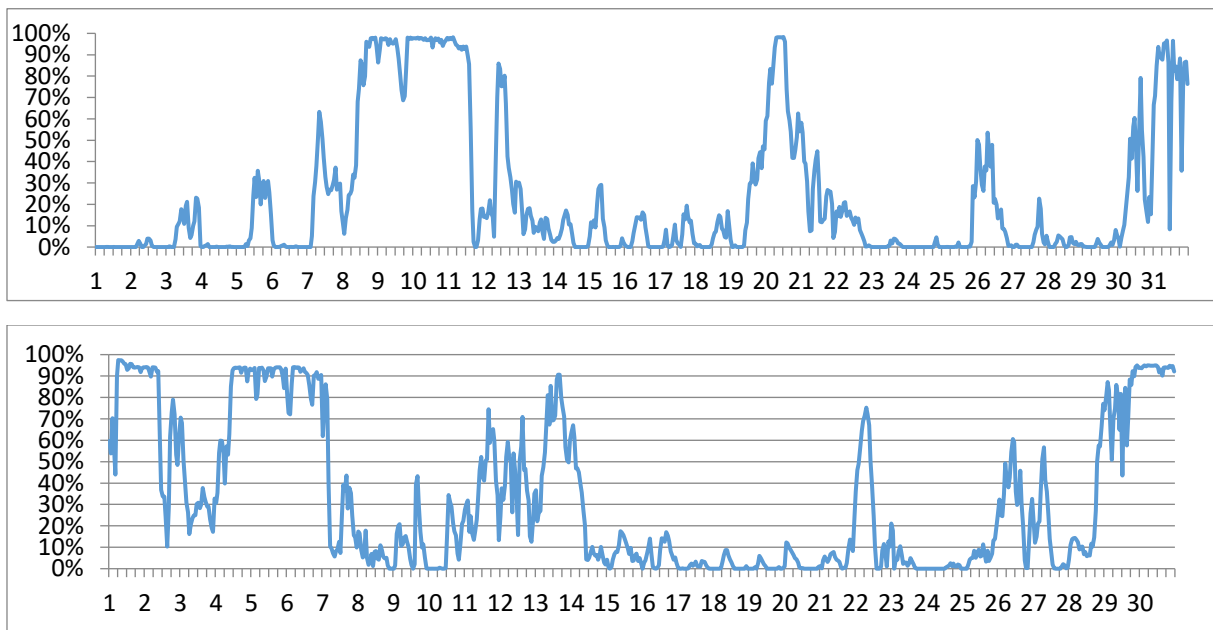


Figure 1 : puissance électrique fournie par la centrale éolienne en mer de Robin Rigg en Ecosse pendant les mois de Mars et Avril 2011, en % de la puissance maximale possible (puissance nominale) de cette centrale. Courtoisie H.Flocard.

On observe que la puissance réellement fournie peut prendre n'importe quelle valeur entre 0 et 100% de la puissance maximale, et cela d'une manière très irrégulière, non seulement au cours d'un mois, mais d'un mois sur l'autre. On observe aussi qu'il y a des périodes d'environ une semaine où la puissance est presque nulle (la voiture reste au garage ou roule au ralenti) et d'autres de 2 à 3 jours où à l'inverse la puissance est proche de la puissance maximale (la voiture roule au maximum des possibilités de son moteur).

C'est ce phénomène que l'on appelle intermittence. Il s'explique très simplement :

Une éolienne transforme la puissance mécanique du vent en puissance électrique.

Or :

- Le vent est très variable à toute échelle de temps ; semaine, jour, heure et minute. Il en est donc de même de l'électricité fournie à chaque instant par une centrale éolienne. C'est ce qu'illustre la figure 1.

- Le vent dépend du dieu Eole (la météo) et non des besoins des hommes. Il en est donc de même de l'électricité produite par une centrale éolienne, alors qu'au moins le conducteur d'une voiture peut décider quand il veut se déplacer et sur quelle distance. C'est pourquoi on dit qu'il s'agit d'une électricité **fatale**, par opposition à l'électricité pouvant être produite selon la volonté des hommes, et non par la seule volonté divine, par des centrales électriques dites **centrales commandables** ou encore **centrales dispatchables** : centrales à combustibles fossiles (charbon, gaz ou pétrole) ou à biomasse, centrales nucléaires, centrales hydroélectriques installées sur des lacs de barrage.

D'autre part :

- La puissance mécanique du vent dépend de sa vitesse, et plus précisément varie comme le cube de cette vitesse. Ce qui signifie que lorsque la vitesse du vent est multipliée par deux, sa puissance est multipliée par $2 \times 2 \times 2 = 8$. C'est ainsi que la puissance du vent qui a soufflé à 200 km à l'heure lors de la grande tempête de fin Décembre 1999 était 8 fois supérieure à celle des habituelles tempêtes d'équinoxe quand le vent souffle à 100 km à l'heure !
- La puissance électrique fournie par une éolienne fluctue donc avec le vent. Mais l'importance de ses fluctuations est de fait très supérieure à celle de la vitesse du vent. **Dans la pratique cependant, pour plusieurs raisons, une éolienne n'est pas capable de transformer intégralement en puissance électrique l'intégralité de la puissance mécanique du vent** : On peut ainsi démontrer que son rendement théorique, c'est-à-dire le rapport de la puissance électrique fournie à la puissance mécanique du vent traversant son rotor, ne peut de toutes façons pas dépasser 60 % environ. C'est ce qu'on appelle la loi de Betz. Mais aussi une éolienne ne peut pas tourner par vent trop faible, moins de 10 km par heure environ, et pour des questions de résistance mécanique ne résiste pas à des vents supérieurs à plus de 90 km par heure, 100 km par heure parfois pour certains modèles récents. Elle est alors mise en drapeau avec arrêt complet de sa production. Entre ces deux extrêmes, on diminue progressivement la prise des pales au vent en modifiant leur orientation sur leur axe (on appelle cela le « pitch »), pour éviter d'endommager la turbine. On transforme donc une fraction de plus en plus faible de la puissance du vent en puissance électrique. Aux vitesses de vents supérieures à environ 45 à 50 km par heure la puissance électrique atteint la puissance maximale (nominale) et y est maintenue. En définitive, la puissance électrique fournie en fonction de la vitesse du vent varie comme le montre la figure 2.

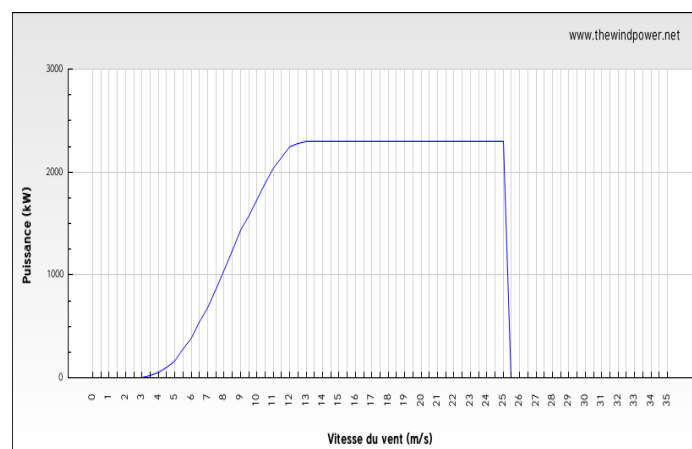


Figure 2 : Augmentation en fonction de la vitesse du vent, en mètres par seconde (m/s), de la puissance électrique fournie par une éolienne Siemens de puissance maximale (nominale) de

2 300 KW (2, 3 MW). Pour transformer les m/s en km/h, multiplier par 3,6. La puissance nominale est ici atteinte pour une vitesse du vent d'environ 45 km/h.

2 - L'intermittence de l'électricité éolienne : Quelles conséquences ?

La conséquence première est que l'électricité produite par des éoliennes ne peut que **par hasard** correspondre à la demande des consommateurs, comme l'illustre la figure 3.

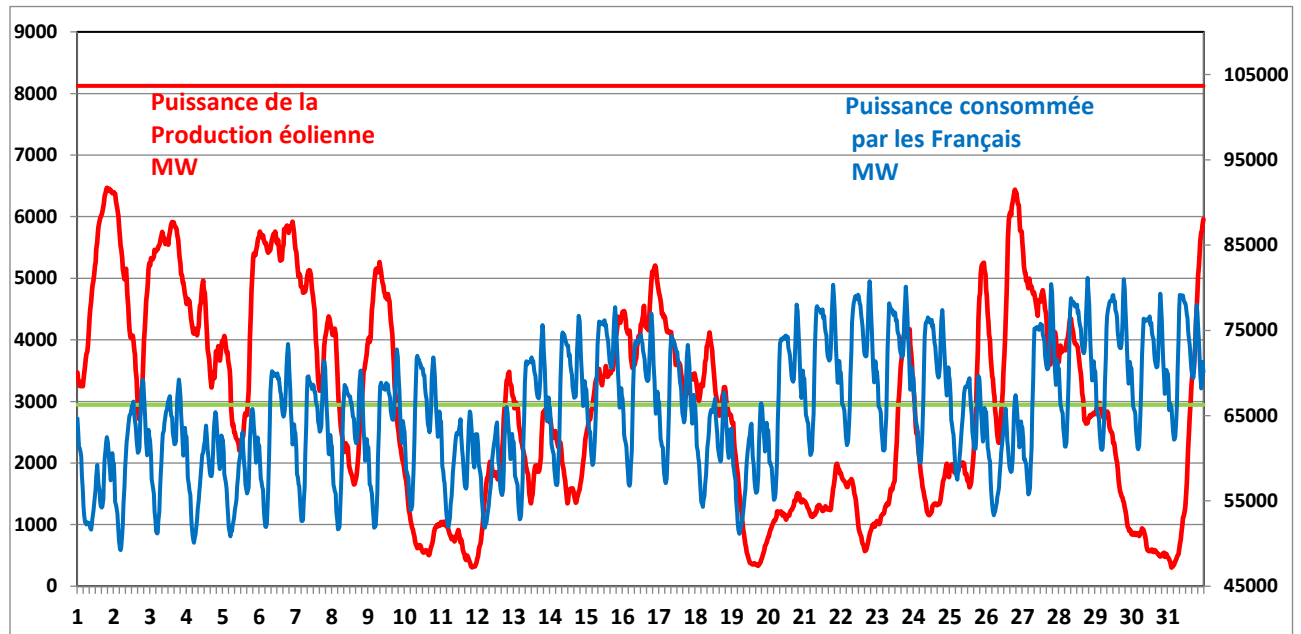


Figure 3 : comparaison, pour le mois de janvier 2014, des variations au cours du temps de la puissance électrique cumulée de la production de l'ensemble des éoliennes françaises (courbe rouge, échelle de gauche, en MW), avec celles de la puissance électrique cumulée de la demande de l'ensemble des consommateurs français (courbe bleue, échelle de droite, en MW). La ligne horizontale verte représente pour ce mois à la fois la moyenne de la puissance de la production éolienne (échelle de gauche) et la moyenne de la puissance consommée par les Français (échelle de droite) : la puissance moyenne consommée a été d'environ 66 000 MW (66 millions de kW) et la puissance moyenne de la production éolienne de 3 000 MW (3 millions de kW) soit 22 fois moins. La ligne horizontale rouge représente la puissance cumulée maximale de l'ensemble des éoliennes installées à cette époque, soit 8 100 MW. Courtoisie H.Flocard.

Cette figure superpose, pour le mois de Janvier 2014, les variations de la demande cumulée de puissance électrique des consommateurs français, en bleu, et celles de la puissance électrique cumulée produite par les éoliennes françaises, en rouge. Pour une comparaison visuelle plus aisée des deux courbes, celles-ci ne sont pas à la même échelle, comme il est expliqué dans la légende. De plus elles ont été décalées pour que leurs valeurs moyennes se superposent sur la ligne verte.

L'échelle de gauche correspond à la production totale d'électricité des éoliennes terrestres françaises (il n'y a pas encore d'éoliennes en mer en fonctionnement en France) pendant ce mois de Janvier 2014. On observe les énormes fluctuations de puissance de cette production, qui résultent de son intermittence. Notons à ce sujet que, contrairement à ce que, malgré l'évidence accumulée depuis des années, certains ont soutenu et soutiennent encore mordicus dans les milieux écologistes, ces fluctuations de puissance subsistent à l'échelle de la France bien que ces éoliennes se trouvent réparties sur tout le territoire. Il n'y a donc pas de véritable compensation d'une production

*insuffisante dans une région de France par un surplus de production dans une autre, phénomène qu'on appelle parfois le **foisonnement**. En effet les éoliennes produisent l'essentiel de leur production par vents forts, c'est-à-dire lors du passage de dépressions météorologiques importantes, et ne produisent pratiquement rien quand un anticyclone s'installe sur le pays. Or la taille des anticyclones comme celle des fortes dépressions dépasse souvent les dimensions de la France entière. Les éoliennes, bien que présentes maintenant un peu partout produisent donc peu ou beaucoup à peu près toutes en même temps. C'est d'ailleurs aussi le cas pour l'Europe de l'Ouest dans son ensemble (voir à ce sujet H.Flocard et J-P. Pervès 2012, «intermittence et foisonnement de l'électricité éolienne en Europe de l'Ouest»*

http://www.sauvonsleclimat.org/images/articles/pdf_files/etudes/A%20Eolien%20en%20Europe%20foisonnement%20et%20production%20de%20H2.pdf).

Sur cette figure 3, l'échelle de droite correspond à celle de la consommation nationale. Comme on le voit, comme dans les autres grands pays industrialisés, la puissance de la consommation d'électricité varie en France de façon cyclique à l'échelle de la journée entre une valeur basse pendant la nuit et des valeurs plus hautes le jour, avec pendant le jour deux **pointes** de consommation, l'une aux alentours de midi, et l'autre aux alentours de 19 heures. Les consommations sont aussi plus faibles les samedis et dimanches. Elle varie aussi, mais plus lentement selon la saison et la température, d'une part du fait de l'habitat équipé en chauffage électrique mais aussi en période de grand froid à cause de l'utilisation de chauffages électriques d'appoint (radiateurs mobiles) qui sont branchés pour compenser les insuffisances du chauffage thermique (fioul, gaz et bois). C'est ainsi que l'on observe pendant ce mois de Janvier 2014 une augmentation progressive de la consommation moyenne du début à la fin du mois, liée à un refroidissement progressif. Mais on doit noter que cette consommation oscille entre des limites qui sont très prévisibles à partir des statistiques bien connues de comportement des usagers.

La puissance effective cumulée moyenne délivrée par les éoliennes était pendant cette période d'environ 3 000 MW (ligne horizontale du bas, en vert), alors que leur puissance cumulée nominale était d'un peu plus de 8 100 MW. Le rapport des deux, ici 37 %, est ce qu'on appelle le **facteur de charge** pour la période considérée. Il est ce mois-ci exceptionnellement élevé, car la moyenne annuelle du facteur de charge en France pour des éoliennes terrestres est plutôt de l'ordre de 22 %. La puissance moyenne consommée (ligne horizontale verte, échelle de droite) est quant à elle d'à peu près 66 000 MW, soit 22 fois plus.

On pourrait en déduire que pour fournir la consommation moyenne d'électricité française uniquement avec les éoliennes pendant ce mois, il aurait suffi d'en avoir installé 22 fois plus que ce qui existait en Janvier 2014. **Mais il en aurait fallu bien plus pour garantir à tout moment pendant ce mois une production d'électricité au moins égale à la consommation** : on remarque en effet que les 12, 20 et 31 Janvier, la production des éoliennes n'était que de 300 MW, faute de vent suffisant bien entendu, alors qu'au même moment la consommation était d'environ 63 000 MW, soit 210 fois plus. C'est donc en fait 210 fois plus de puissance éolienne nominale, soit 1 700 000 MW (1 700 GW) qu'il aurait fallu avoir installé pour garantir la consommation française à ces moments-là. Comme les éoliennes terrestres modernes font actuellement environ 3 MW de puissance nominale, ce sont donc environ 570 000 éoliennes de 3 MW (de 180 mètres de haut pales comprises) qu'on aurait dû implanter, soit en moyenne un peu plus d'une par km² du territoire français métropolitain !!! Au coût actuel d'environ 1,5 millions d'euros par MW nominal, l'investissement total aurait été d'environ 2550 milliards d'euros, soit de quoi construire plus de 250 réacteurs nucléaires du type de l'EPR de Flamanville (alors que 4 fois moins de ces réacteurs permettraient de satisfaire l'essentiel de la consommation du pays) !!!

Mais en érigeant autant d'éoliennes on créerait un autre problème : on observe en effet que le premier et le 27 Janvier, la puissance effective des éoliennes a atteint environ 6500 MW, soit 80 % de leur puissance nominale. La puissance cumulée de ces 570 000 éoliennes aurait alors atteint environ 1 400 000 MW (1400 GW) alors que les besoins n'étaient que d'environ 60 000 MW !!! Que faire de cette énorme production excédentaire ? L'exporter dans les pays voisins, mais encore faut-il qu'ils en aient besoin, alors que justement leurs éoliennes produiraient au même moment de considérables excédents ? Passer cette production par pertes et profits, en mettant les éoliennes en drapeau dès que leur production dépasse la consommation ? Cela ferait baisser leur facteur de charge bien au-dessous des 37 % observés figure 3, illustrant une fois de plus l'énorme gaspillage associé à ce gigantesque investissement éolien.

On voit sur cet exemple qu'il est irréaliste de vouloir assurer la consommation d'électricité française seulement au moyen d'éoliennes. Pour harmoniser production et consommation il faut nécessairement procéder autrement. En théorie, on peut envisager deux solutions, si l'on désire à tout prix, c'est le cas de le dire, construire des éoliennes :

- soit associer aux éoliennes des **centrales commandables**, centrales à combustibles fossiles, centrales nucléaires, centrales hydroélectriques de lacs, centrales à biomasse... qui produisent à la demande de façon à compenser les fluctuations de la production éolienne pour ajuster la production d'électricité à sa consommation. Les éoliennes n'ont alors pas besoin d'être aussi nombreuses, mais dans ce cas la plus grande partie de la production d'électricité est en fait réalisée par les centrales commandables. On peut donc se demander s'il est alors bien utile de construire des éoliennes, d'autant plus comme on le verra plus loin que c'est une solution très coûteuse, alors que ces centrales commandables sont capables d'assurer à elles seules les besoins des consommateurs à bien moindre prix.

- soit être capable de stocker l'électricité produite en excès par les éoliennes pour la restituer dans les périodes de production insuffisante. Dans ce dernier cas, il faudra tenir compte des pertes d'énergie électrique pendant le cycle stockage-déstockage, ce qui conduira à encore augmenter le nombre d'éoliennes pour compenser ces pertes. Or cette solution, si elle peut être envisagée pour des particuliers, **à condition qu'ils ne soient pas trop nombreux**, est en fait irréalisable actuellement à l'échelle d'un pays comme la France. En effet on ne connaît pas de méthode permettant de stocker les énormes quantités d'énergie électrique mises en jeu. Et, sauf découvertes révolutionnaires dans les méthodes de stockage en masse de l'électricité, pour lesquelles il n'existe aucune piste connue actuellement, cela restera le cas dans les prochaines décennies. **(voir à ce sujet B.Durand 2017, « Electricité éolienne et solaire, émissions de CO2, et prix de l'électricité pour les ménages en Europe de l'Ouest »**

http://www.sauvonsleclimat.org/images/articles/pdf_files/etudes/Electricites%20intermittentes.pdf
et en particulier l'annexe 1 de ce document).

Les milieux écologistes prétendent qu'il n'en est rien, et vantent les mérites de la méthode dite power-to-gas, qui consiste à produire de l'hydrogène par électrolyse de l'eau, ou du méthane en combinant ensuite cet hydrogène avec du gaz carbonique, à partir des excédents d'électricité éolienne, et d'utiliser cet hydrogène ou ce méthane pour produire en retour de l'électricité dans des centrales électriques adaptées à cet usage. Mais c'est irréaliste car le rendement global de ces procédés est très faible, de l'ordre de 20 %, ce qui conduit à installer environ cinq fois plus d'éoliennes, mais aussi une chaîne industrielle d'une grande complexité pour produire au final la même quantité d'électricité. Ce procédé serait extrêmement coûteux en investissements et aucune validation industrielle n'en a été faite à ce jour (voir à ce sujet G.Sapy 2015 : pertes énergétiques du schéma power-to-gas + gas-to-power.

http://www.sauvonsleclimat.org/images/articles/pdf_files/etudes/Pertes%20energetiques%20Power-to-gas-to-power.pdf)

Dans les deux cas, c'est à partir des propriétés et du coût du « mix électrique » que constitue d'une part l'ensemble des éoliennes et d'autre part soit les centrales commandables, soit les dispositifs de stockage qu'il faut raisonner, et non à partir des propriétés et du coût des seules éoliennes. On va voir que le coût en matériel de ce mix, même si le prix à la production de l'électricité éolienne diminue considérablement, sera bien supérieur à celui des éoliennes seules. C'est la raison principale pour laquelle le recours à l'éolien ne peut que faire augmenter considérablement le coût de l'électricité pour les ménages, comme on le verra sur l'exemple de l'Allemagne.

Nous allons préciser tout cela dans les exemples qui suivent.

3- Une éolienne peut-elle à elle seule assurer l'autonomie électrique d'un ménage ?

La réponse est non, à moins d'accepter de se passer d'électricité quand il n'y a pas de vent.

La figure 4 schématise la situation d'une habitation équipée d'une éolienne pour assurer sa production d'électricité. Conformément à l'hypothèse d'autonomie électrique, on a supposé que le ménage qui l'habite n'a jamais recours au réseau électrique d'EDF pour sa consommation. Cette situation peut se rencontrer en France dans des lieux où il n'y a pas de réseau électrique, par exemple en haute montagne. Un ménage peut aussi choisir de se placer dans cette situation, par exemple pour démontrer qu'il peut être autonome (On peut décrire ce choix comme le « défi de Robinson Crusoé »).

La production électrique de l'éolienne ressemblera à celle indiquée en haut et à droite de cette figure 4. Elle fluctuera donc fortement d'un moment à l'autre et même plus que ce qui est montré sur cette figure, car celle-ci reprend les fluctuations de la production éolienne totale française montrée figure 3. Or une habitation isolée ne bénéficiera pas du petit effet de foisonnement qui existe à l'échelle de la France, qui amortit un peu les fluctuations à l'échelle locale. A moins d'adopter un mode de vie qui s'adapte en permanence à ce profil temporaire de production, c'est-à-dire de n'avoir aucune activité utilisant de l'électricité quand il n'y a pas suffisamment de vent (et aussi de ne pas ouvrir alors son congélateur), **c'est-à-dire la plus grande partie du temps**, la production d'électricité de cette éolienne ne correspondra donc que par hasard à la consommation désirée, dont le profil type pour un citoyen français ressemblera plutôt à celui dessiné en bas à droite de la figure. **Il ne s'agit donc pas là d'une véritable autonomie.**

Considérons par exemple un ménage qui aura installé une éolienne dont la production moyenne (ligne horizontale rouge) correspond à sa consommation moyenne et qui souhaite mener une vie domestique comparable à celle d'un ménage français moyen (consommation selon la courbe bleue).

Il pourra avoir acheté un groupe électrogène qui devra alors être prêt à fonctionner en permanence en compensant les irrégularités de la production éolienne de façon à assurer l'adéquation entre production et consommation. Celui-ci devra être dimensionné pour pouvoir produire la puissance maximale possible de la consommation du ménage, quelle que soit la production intermittente qu'il aura à assister. **Ce ménage devra alors accepter de gaspiller de l'énergie éolienne** (par exemple en mettant l'électricité produite à la terre ou en allumant des guirlandes lumineuses même en plein jour, ou encore en équipant son éolienne d'un dispositif diminuant automatiquement son efficacité par modification de sa prise au vent), lorsque la production de la turbine excèdera le besoin de consommation.

Le ménage peut aussi avoir plutôt choisi de se munir d'une batterie permettant de stocker l'électricité quand elle excède la consommation afin de la restituer dans la situation inverse. Alors, comme le stockage implique des pertes, (environ 30 % de la quantité stockée pour une batterie) il faudra surdimensionner la puissance de l'éolienne par rapport au cas d'une assistance par groupe électrogène.

L'éolienne produisant, ainsi que le groupe électrogène, du courant continu, et le stockage ne pouvant fonctionner qu'en courant continu, il faudra ajouter des onduleurs à ce système, pour transformer le courant continu en courant alternatif, et bien sûr gérer l'ensemble par un dispositif électronique de gestion. Il faut aussi compter avec des pertes d'énergie dans tous ces dispositifs électroniques, même lorsqu'ils sont en veille.

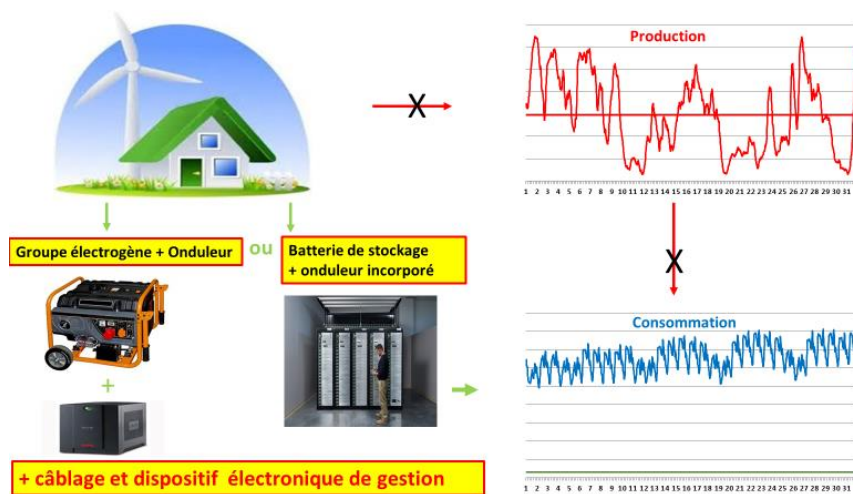


Figure 4 : Schéma de principe d'une habitation non raccordée au réseau électrique et utilisant une éolienne pour produire son électricité.

Une combinaison d'un groupe électrogène et d'une batterie est aussi possible, mais cet ensemble sera encore plus complexe et coûteux.

Un système qui est souvent présenté comme simple, se révèle donc à la fois complexe et fragile (les batteries et les onduleurs ayant des durées de vie limitées et pour les batteries solides une fiabilité aléatoire), et demandant une maintenance rigoureuse. Il sera **bien sûr beaucoup plus coûteux** que la seule éolienne qu'on imaginait au départ. De plus si l'on utilise un groupe électrogène de compensation, l'autonomie restera toute relative puisque ce groupe consommera du gazole (et sera polluant). **En fait, il est facile de voir que ce ménage isolé paierait son électricité beaucoup moins cher en la produisant avec le seul groupe électrogène.**

Remarquons aussi que la consommation électrique d'un ménage comporte une part indirecte, qui est la consommation électrique nécessaire à la fabrication des objets matériels utilisés par ce ménage, comme par exemple voiture et appareils ménagers, **part qui ne peut pas être assurée par ce système. De plus si notre ménage choisit de participer à la vie de la société, ce n'est pas son petit système qui fournira sa participation à la consommation pour le fonctionnement des écoles, des hôpitaux, des services publics, de l'éclairage et des transports urbains. Nous sommes donc en fait très loin de l'autonomie revendiquée au départ.**

4- une centrale éolienne peut-elle assurer à elle seule l'autonomie électrique d'un village, d'une ville ou d'une région ?

La réponse est encore non, et pour les mêmes raisons que dans le cas d'une maison isolée.

La figure 5 montre l'exemple d'une centrale éolienne en mer. Son profil de production est montré en haut et à droite de la figure : on voit que les fluctuations y sont plus brutales que pour l'exemple terrestre de la figure 4. En effet, **contrairement à ce qui est affirmé par les promoteurs de telles centrales**, les fluctuations du vent y sont plus intenses qu'à terre parce que le vent y est moins freiné, faute d'obstacles.

Mais, alors que dans le cas d'une habitation on pouvait envisager une assistance par un stockage électrique, on peut à la rigueur l'envisager pour un village, mais pas pour une ville, et encore moins pour une région ou un pays, la capacité de stockage requise étant alors beaucoup trop importante. Comme dit plus haut, on ne sait pas actuellement stocker de très grandes quantités d'électricité et, malgré des recherches intensives, aucune solution n'est actuellement en vue.

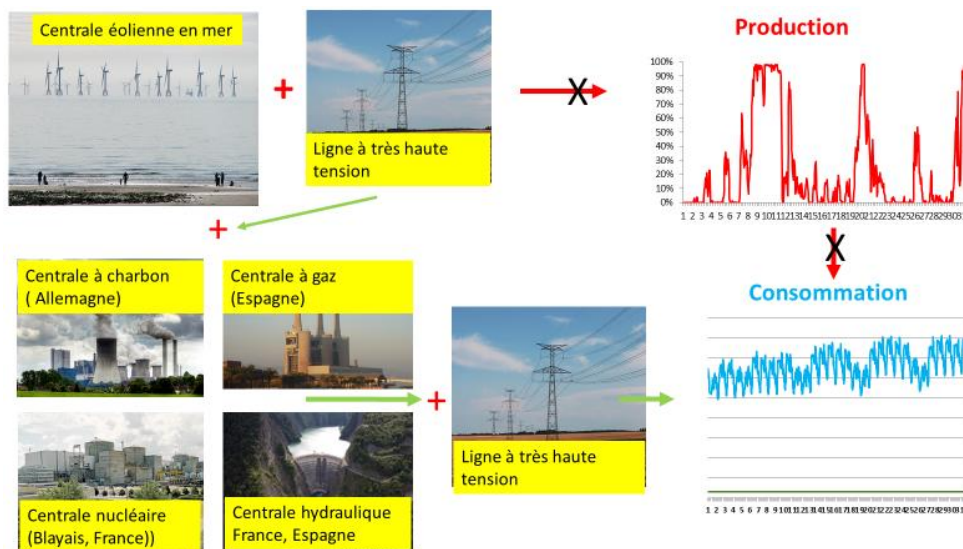


Figure 5 : schéma de principe d'une centrale éolienne en mer assistée par des centrales commandables pour ajuster sa production à la consommation.

La centrale éolienne doit donc être assistée par des centrales commandables, qui jouent le rôle du groupe électrogène dans le cas d'une maison isolée et de fait, ces centrales sont amenées à produire beaucoup plus d'électricité que la centrale éolienne elle-même. La construction de nouvelles lignes à très haute tension sera de plus nécessaire pour relier entre elles les différentes composantes de ce mix électrique complexe. **Ce mix, on le comprend, est au total bien plus coûteux que la seule centrale éolienne**, comme le mix électrique de la maison isolée était bien plus coûteux que la seule éolienne.

Si ces centrales sont des centrales à charbon comme c'est le cas en majorité en Allemagne et au Danemark, ou plutôt des centrales à gaz comme en Espagne, **elles émettront du gaz carbonique mais aussi une dangereuse pollution atmosphérique qui affecte en Europe non seulement les pays producteurs mais aussi leurs pays riverains (voir http://awsassets.wwfffr.panda.org/downloads/dark_cloud_full_report.pdf et <https://vimeo.com/172886975>)**, tout comme le groupe électrogène de notre maison «autonome». C'est beaucoup moins le cas en France où il s'agit surtout de centrales nucléaires et de centrales hydroélectriques.

Si l'on veut éliminer en France les centrales nucléaires, on voit donc qu'on ne peut pas le faire avec seulement des éoliennes, puisque celles-ci ont besoin de centrales commandables pour être utilisables (c'est aussi le cas des installations solaires photovoltaïques). Les possibilités de construire de nouvelles centrales hydroélectriques étant malheureusement maintenant très limitées en France, on ne pourrait donc pour cela que remplacer nos centrales nucléaires par des centrales à gaz et à charbon, comme le fait en ce moment l'Allemagne.

Ces centrales commandables, grâce à l'inertie de leurs turbines et cela est très peu connu, sont de plus nécessaires pour assurer la stabilité en fréquence du réseau, ce que ne peuvent faire par elles-mêmes des éoliennes (sauf pour les plus grandes et à condition d'accepter une diminution de leur productivité). Or si la fréquence du courant alternatif circulant sur le réseau (50 hertz sur le réseau européen) n'était pas maintenue dans des limites très étroites, il y aurait immédiatement un black-out. C'est ce qui se passerait si nous n'étions alimentés qu'avec des éoliennes.

Des lignes à très haute tension sont de plus nécessaires pour relier entre elles les différentes parties de ce mix électrique. **Ce mix, on le comprend, est au total bien plus coûteux que la centrale éolienne elle-même, comme le mix électrique de la maison isolée était bien plus coûteux que l'éolienne elle-même.**

Du fait de la nécessité de l'assister par des centrales commandables, le caractère renouvelable de l'éolien, tant vanté actuellement, n'est donc que théorique (et il en est de même du solaire photovoltaïque) : En effet si les centrales commandables ne sont plus disponibles, l'éolien deviendra à peu près inutilisable pour la production d'électricité. L'assistance par des centrales hydroélectriques atteint on l'a vu ses limites en France, mais c'est aussi le cas ailleurs en Europe. Or les combustibles des centrales nucléaires et à combustibles fossiles ne sont pas renouvelables. Ces centrales ne pourront plus produire quand leur combustible sera épuisé, ou en cas de rupture d'approvisionnement. Au même moment, la plus grande partie des éoliennes européennes ne pourra plus produire grand-chose d'utilisable. Le caractère renouvelable de l'électricité éolienne est donc en l'état largement illusoire.

Un argument fréquemment avancé est que l'éolien permet d'économiser les combustibles des centrales commandables, nucléaires ou à combustibles fossiles, retardant ainsi le moment où ceux-ci seraient épuisés. Mais cela est loin d'être aussi évident qu'il n'y paraît, d'une part parce que la proportion d'électricité produite par l'éolien dans un système où éolien et centrales commandables sont associées, ne peut guère dépasser 20 à 30 % de la production totale, et par conséquent cela ne peut diminuer considérablement la consommation de combustibles, fossiles ou nucléaire. Mais aussi les variations de régime qui sont imposées à ces centrales par leur assistance à l'éolien en diminuent le rendement énergétique, et donc augmentent la quantité de combustibles qu'elles utilisent pour produire une même quantité d'électricité. L'intérêt de l'éolien et du solaire pour diminuer nos consommations de combustibles est donc bien maigre et n'affectera pas beaucoup les échéances de leur épuisement (Voir par exemple <https://www.masterresource.org/wind-power/wind-integration-incremental-emissions-from-back-up-generation-cycling-part-v-calculator-update/>). D'autre part, on le voit très bien actuellement en Europe, le développement de l'éolien a comme résultat d'attirer les investisseurs parce que, du fait de son mode subventionné de financement, il offre des rendements des capitaux investis élevés et garantis par des contrats de longue durée. La conséquence est qu'il n'y a plus assez d'investissements dans les centrales commandables, ce qui est en train de ruiner leurs possibilités d'amélioration, alors que paradoxalement elles sont indispensables au fonctionnement de l'éolien.

Le stockage en masse et à bas coût de l'électricité permettrait de résoudre une grande partie de ces problèmes. Mais malgré des recherches intensives sur ce thème depuis des années, aucune piste sérieuse n'est encore en vue, et il en sera probablement ainsi dans les prochaines décennies. Vouloir développer l'éolien (et le solaire photovoltaïque) à marche forcée comme on le fait actuellement, c'est mettre la charrue avant les bœufs : il serait bien préférable de mettre l'argent ainsi gaspillé à accélérer les recherches sur le stockage de l'électricité.

5- Une comparaison des mix électriques de la France et de l'Allemagne

L'Allemagne, contrairement à la France, a fortement développé l'électricité éolienne et l'électricité photovoltaïque. Elle aura aussi fermé en 2022 ses dernières centrales nucléaires, tandis que la France les a pour l'instant conservées. Il est intéressant de comparer les conséquences de ces deux politiques différentes sur la diminution des émissions de CO₂ de la production d'électricité, objectif officiellement affiché pour justifier le développement des électricités renouvelables, et sur le prix de l'électricité pour les ménages.

Les productions d'électricité de la France et l'Allemagne ont eu depuis 2000 des évolutions très similaires (figure 6). Elles ont augmenté jusqu'en 2005-2006, puis ont stagné et en 2009 ont fortement chuté du fait de la crise économique. Elles se sont ensuite reprises, ont chuté à nouveau en 2011 après Fukushima, puis ont un peu remonté jusqu'en 2013. Depuis, elles sont en léger mais continu déclin.

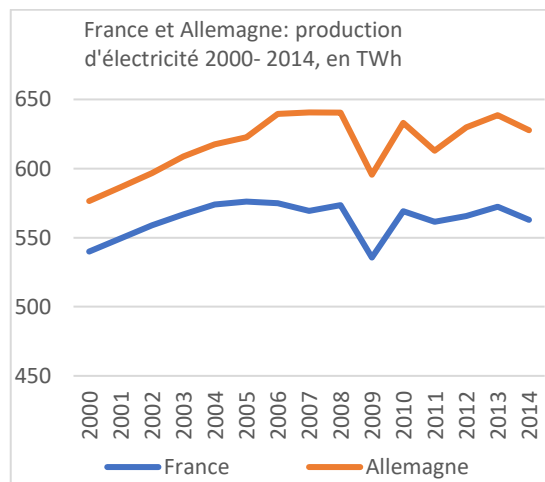


Figure 6 : historiques de production brute d'électricité de 2000 à 2014 pour l'Allemagne, en rouge, et la France, en bleu.

Pour leur production électrique, les deux pays disposent d'une flotte variée de centrales, dont l'évolution des capacités (leurs puissances maximales) de 2000 à 2015 est indiquée par catégorie sur la figure 7. Celle-ci est établie à l'aide des données fournies par l'European Network of Transmission System Operators for Europe (ENTSO E). En dépit d'une production électrique quasiment inchangée depuis 2005, on observe (courbe rouge) une croissance de ces capacités. Mais dans les deux pays elle est due presque exclusivement à une augmentation des capacités des « nouvelles énergies renouvelables » (N. Renouv., courbe vert sombre), c'est-à-dire pour l'essentiel de l'éolien et du solaire photovoltaïque (ELRi courbe vert clair) le reste correspondant à des centrales à biomasse. C'est ainsi que l'Allemagne a presque doublé ses capacités de production électrique, et cela essentiellement du fait de l'éolien et du solaire photovoltaïque.

En France, les capacités des centrales nucléaires (courbe marron), des centrales à combustibles fossiles (charbon, gaz, pétrole, courbe noire) et des centrales hydroélectriques (courbe bleue) sont restées remarquablement constantes. En Allemagne, on observe la diminution des capacités nucléaires due à la fermeture de 7 réacteurs après Fukushima. Mais on observe aussi que la fermeture de réacteurs nucléaires suite à Fukushima a été étre plus que compensée par l'ouverture de nouvelles capacités de centrales à combustibles fossiles.

Cette augmentation des capacités par un développement de l'éolien et du solaire photovoltaïque alors que la production totale d'électricité stagnait et même diminuait signifie que les centrales commandables (nucléaires, fossiles, hydroélectricité...) ont dû diminuer leur production pour faire place aux productions de l'éolien et du solaire PV, qui de par la loi ont une priorité d'accès absolue sur le réseau (malgré qu'elles soient plus onéreuses pour le consommateur).

Comme on le voit sur la figure 7, parce qu'il était impossible de fermer ces centrales commandables car elles sont indispensables pour gérer l'intermittence de l'éolien et du solaire photovoltaïque, **la capacité totale de ces centrales n'a pas diminué ne serait-ce que d'un watt**. Cela a eu pour résultat de faire croître les coûts du kWh produit par ces centrales commandables, car par unité de capacité elles ont dû produire moins d'électricité avec les mêmes charges fixes. D'autre part, cette augmentation des capacités des renouvelables sans pouvoir diminuer les capacités des centrales commandables en période de stagnation de la production d'électricité ont entraîné une dépense supplémentaire en investissements très importante pour un même nombre de kWh produits.

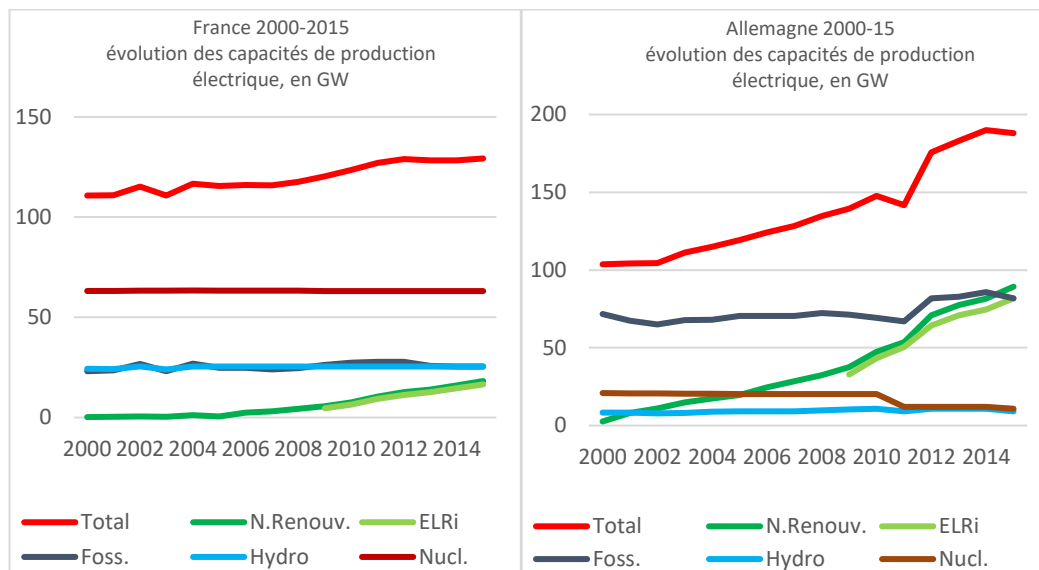


Figure 7 : France , à gauche, et Allemagne, à droite : évolution de 2000 à 2015 des capacités des moyens de production d'électricité, classés par catégorie. Les statistiques sur l'éolien+ solaire photovoltaïque (Electricités renouvelables intermittentes = ELRi) ne sont renseignées que depuis 2009. Mais les capacités électriques des Nouvelles électricités renouvelables (N.Renouv.) dont les ELRi constituent l'essentiel sont renseignées depuis 2000. Les données sont celles de L'European Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSO E).

Ajoutons à cela qu'il a fallu développer le réseau électrique haute tension pour accueillir l'électricité éolienne, comme on le comprend bien en regardant attentivement la figure 5 (de son côté l'implantation du solaire photovoltaïque nécessite surtout le développement du réseau basse tension).

Il était donc inévitable que cette politique de développement des renouvelables fasse augmenter le coût global de l'énergie électrique produite et cela comme on va le voir beaucoup plus en Allemagne qu'en France, où ce développement a été pour l'instant plus modéré. Comme pour des raisons de compétitivité internationale, les gouvernements ont cherché à limiter les augmentations de coût pour les industries et les commerces exportateurs et gros consommateurs, cette augmentation a été répercutée presque intégralement sur les ménages, les petites entreprises et les petits commerces.

La figure 8 montre qu'il y a eu effectivement en Allemagne une augmentation du coût de l'électricité pour les ménages directement liée à l'augmentation des capacités d'éolien et de solaire photovoltaïque. La même relation est observée en France depuis le Grenelle de l'environnement en 2009, qui a été le point de départ de l'augmentation des capacités d'éolien et de solaire photovoltaïque dans notre pays. En d'autres termes, c'est essentiellement à cause du développement de l'éolien et du solaire photovoltaïque que l'on connaît, en Allemagne, mais aussi maintenant en France, une augmentation rapide du prix de l'électricité pour les ménages.

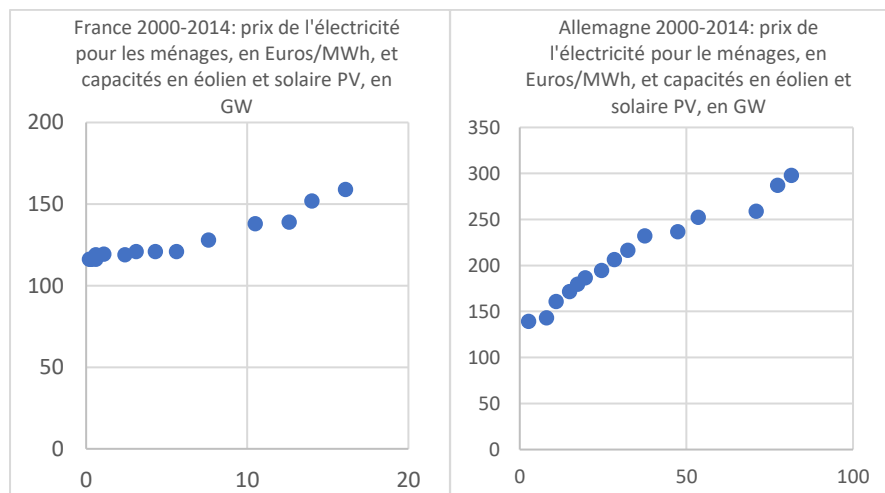


Figure 8: Relation entre le coût de l'électricité pour les ménages et les capacités totales installées en éolien + solaire photovoltaïque en France et en Allemagne. L'échelle verticale donne pour chaque année (point bleu) le prix du MWh facturé au consommateur alors que l'échelle horizontale donne pour cette même année la puissance éolienne et solaire photovoltaïque maximale en GW.

La même tendance, résultat de politiques similaires est observée maintenant partout en Europe de l'Ouest, comme le montre la figure 9 : le prix de l'électricité pour les ménages y est maintenant en moyenne d'autant plus grand que les capacités installées par habitant d'éolien et de solaire photovoltaïque sont élevées.

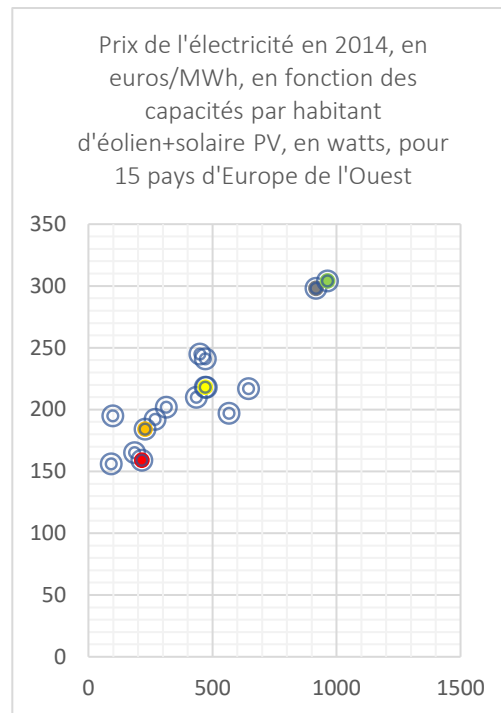


Figure 9 : Prix de l'électricité pour les ménages, en euros par MWh, et capacités d'éolien + solaire PV installées par habitant pour 15 pays d'Europe de l'Ouest, en watts. Le point rouge correspond à la France, le point orange aux Pays-Bas, le point noir à l'Allemagne et le point vert au Danemark. Le point jaune correspond à la moyenne en Europe de l'Ouest.

Pour finir, comparons (figure 10) les résultats de cette politique à la fois sur le coût de l'électricité pour les ménages et sur les émissions de CO₂ de la production électrique de la France et de l'Allemagne :

- Le coût de l'électricité pour les ménages a plus que doublé en Allemagne de 2000 à 2014, et commencé à croître beaucoup en France après le Grenelle de l'Environnement, qui a été le point de départ du développement de l'éolien et du solaire photovoltaïque dans notre pays.
- Les émissions de CO₂ de la production électrique allemande n'ont que peu diminué malgré l'éolien et le solaire photovoltaïque, et sont même reparties à la hausse après la fermeture de réacteurs nucléaires après 2011, suite à Fukushima. Cela est dû à ce que plus de la moitié de l'électricité allemande est encore produite avec des centrales à combustibles fossiles, charbon surtout (dont pour environ la moitié de celui-ci sous forme de sa variété la plus polluante et dont l'exploitation est la plus destructrice de l'environnement, le lignite), mais aussi gaz et fuel. Les émissions de CO₂ de la production électrique française sont comparativement très faibles, et cela est dû à ce que cette production est à 90 % assurée par des centrales nucléaires et hydroélectriques. Elles ont même sensiblement décru, une partie des centrales à charbon ayant été remplacée par des centrales à gaz, moins émettrices. Des centrales à charbon ont également pu être fermées parce que 3 GW des réacteurs nucléaires du Tricastin, utilisés jusqu'en 2013 pour l'enrichissement d'uranium par diffusion gazeuse, ont été affectés à la consommation « civile » suite au remplacement de la diffusion gazeuse

par l'ultracentrifugation, 50 fois moins consommatrice d'électricité.

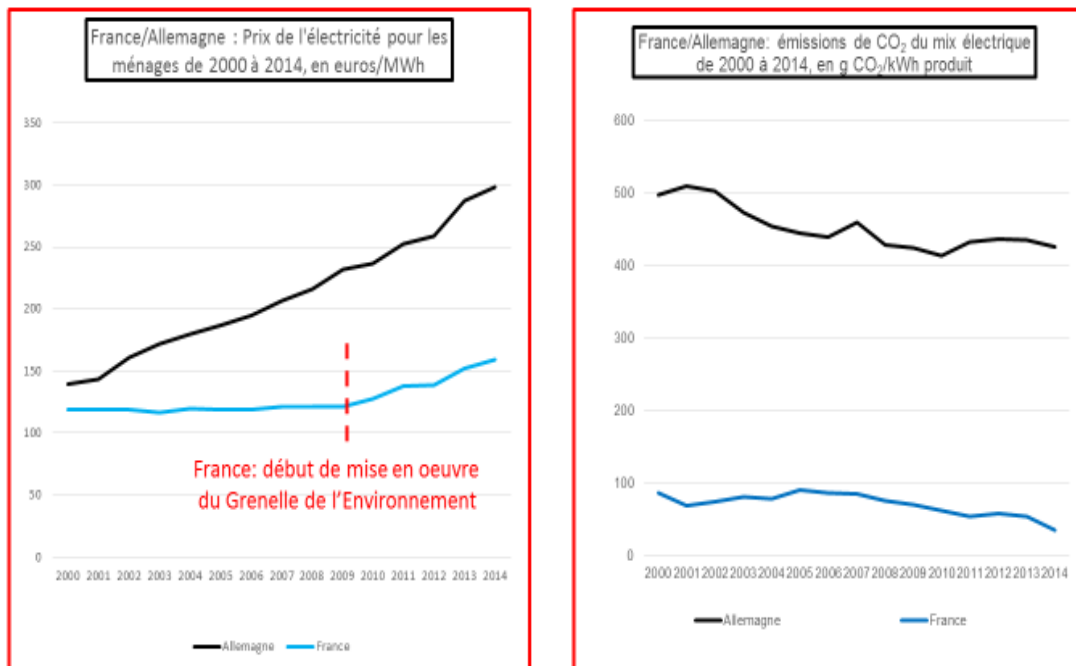


Figure 10 : Comparaison pour la France et l'Allemagne de 2000 à 2014, à gauche du prix de l'électricité pour les ménages et à droite des émissions de CO₂ de la production d'électricité

Il faut donc s'attendre à ce que le développement à marche forcée en France de l'éolien et du solaire photovoltaïque en France, préconisé en ce moment par une grande partie du monde politique, produise les mêmes résultats qu'en Allemagne, c'est-à-dire une très forte augmentation du prix de l'électricité pour les ménages, et une augmentation de nos émissions de CO₂.

Conclusion :

On a montré que les lois élémentaires de la physique ainsi que les conditions technico-industrielles actuelles font qu'un développement important de l'éolien et du solaire photovoltaïque dans notre pays conduirait à une augmentation considérable du coût de l'électricité pour les ménages. On a également vu que ce développement ne permettrait pas de diminution significative des émissions de CO₂ de notre production d'électricité, puisque celles-ci, grâce au nucléaire, sont les plus faibles des grandes nations industrialisées. On a vu également qu'il ne permettrait de « sortir du nucléaire » qu'au prix d'un remplacement (qu'il conviendra de financer bien sûr) de nos centrales nucléaires par des centrales à combustibles fossiles, comme c'est le cas en Allemagne. De plus pour exploiter ces centrales encore à construire on augmenterait le budget d'importation des combustibles fossiles alors que ceux-ci constituent déjà le premier poste du déficit commercial de la France.

On peut prédire à coup sûr que poursuivre l'application de la loi de transition énergétique par un alignement de notre mix de production électrique sur celui de l'Allemagne, comme c'est le cas actuellement, c'est-à-dire le développement « über alles » de l'éolien et du solaire photovoltaïque et l'élimination du nucléaire, produirait chez nous une forte augmentation du prix de l'électricité et de nos émissions de CO₂, sans parler en ce qui concerne l'éolien d'une destruction des paysages et de l'environnement sans précédent dans l'histoire moderne.

Ce développement à marche forcée est parfaitement déraisonnable, et cela tant que l'on ne saura pas stocker en masse l'électricité. Notre gouvernement, qui dispose des experts nécessaires, ne peut

l'ignorer. Si ce développement a encore du crédit dans l'opinion publique, c'est parce qu'un gigantesque décervelage a été organisé par les lobbys industriels à l'échelle de l'Europe, avec le concours d'une grande partie de la classe politique et des médias, pour cacher l'évidence aux personnes peu au fait de ces questions, c'est-à-dire l'immense majorité.

Il faut aussi observer que ce développement, par son mode de financement c'est-à-dire des taxes sur la consommation d'électricité pour équilibrer les subventions nécessaires au développement les capacités d'éolien et de solaire photovoltaïque provoque un immense transfert de richesse des consommateurs les plus pauvres vers les plus riches et bien sûr aussi vers les promoteurs éoliens et solaires. Cette politique est donc antisociale.

La physique et les faits finiront forcément par reprendre leurs droits, comme on commence à l'observer en Allemagne. Mais en attendant, que d'argent gaspillé ! Mais n'est-ce pas, quand on aime on ne compte pas, surtout quand il agit de l'argent des citoyens.

Annexe : Les techniques de décervelage utilisées par les promoteurs de l'éolien et du solaire photovoltaïque.

Ces techniques consistent essentiellement en des mensonges par omission qui, à force d'avoir sans arrêt été martelés à l'aide de tous les vecteurs d'information par les lobbys industriels et une grande partie du monde politique et des médias, constituent maintenant un « prêt-à-penser » qui n'est plus remis en question par les personnes peu au fait de ces questions. Or celles-ci constituent l'immense majorité de l'opinion. En voici les exemples les plus courants :

- prétendre qu'une centrale éolienne (ou solaire photovoltaïque) produira la consommation de tant de ménages ou même d'une grande ville ou d'une région. Un exemple est en ce moment l'affirmation par son promoteur, relayée consciencieusement par les médias, qu'installer une centrale éolienne en mer au large de l'île d'Oléron produirait l'électricité nécessaire à la totalité des ménages de la Charente-Maritime. Si la quantité **totale** que cette centrale produirait dans l'année serait effectivement du même ordre de grandeur que la quantité **totale** nécessaire à la consommation de ces ménages, hors chauffage électrique toutefois, l'électricité produite par une telle centrale serait, du fait de son intermittence, **parfaitement inutilisable** par les ménages en question sans l'assistance des centrales commandables, principalement nucléaires et hydrauliques en France. En outre cette électricité est **parfaitement inutile**, aussi bien pour la Charente-Maritime que pour le reste de la France, les ménages y étant déjà correctement approvisionnés et la tendance de la consommation électrique étant en France à la diminution de la consommation d'électricité et non à sa hausse (figure 6). D'autre part, ces ménages, rappelons-le, consomment indirectement de l'électricité, via la fabrication de leurs produits de consommation, mais aussi via les services qui leur sont nécessaires comme les services de santé ou d'éducation, et cela représente plus que leur consommation directe. Cette affirmation, acceptée instinctivement mais sans réflexion par l'opinion parce qu'elle semble avoir du sens, n'en a en réalité aucun et est un trompe l'œil volontaire.

- prétendre que s'il n'y a pas de vent suffisant en un endroit, il y en a bien assez ailleurs et qu'ainsi l'électricité produite par les éoliennes suffit toujours à la consommation : c'est le fameux slogan : « il y a toujours du vent quelque part ». On a vu qu'il n'en était rien, en France comme en Europe, et cela est connu depuis longtemps. Mais cela n'empêche pas le slogan de continuer à circuler.

- prétendre qu'il faut de l'éolien et du solaire photovoltaïque parce qu'il ne faut pas mettre tous ses œufs dans le même panier ! Cette remarque aurait du sens si l'éolien et photovoltaïque étaient indépendant des centrales commandables, par exemple si l'on pouvait construire des stockages suffisants pour assurer leur autonomie. Mais on a vu que ce n'était pas le cas, et cela de très loin et

pour longtemps. Pour l'essentiel, l'éolien, et le solaire photovoltaïque sont en fait pour l'instant dans le même panier que les centrales commandables.

- prétendre qu'une centrale éolienne ou solaire photovoltaïque permet d'éviter annuellement l'émission de tant de tonnes de CO₂. Les éoliennes il est vrai produisent peu de CO₂ par kWh d'électricité produite, via leur construction essentiellement, mais il en est de même du nucléaire et de l'hydraulique qui constituent l'essentiel du mix électrique Français. Ce raisonnement, qui est applicable à des pays comme l'Allemagne, et encore, car on a vu que cela n'y marchait pas vraiment, ne l'est pas à la France. D'autre part, si le développement de l'éolien (et du solaire photovoltaïque) rendait nécessaire un jour en France son assistance par des centrales commandables à combustibles fossiles, son développement ferait au contraire considérablement augmenter nos émissions de CO₂.

- prétendre que le développement de l'éolien (ou du solaire photovoltaïque) est nécessaire pour sortir du nucléaire. Il n'en est pourtant rien car le développement de l'éolien on l'a vu ne peut pas faire diminuer les capacités des centrales commandables qui l'assistent. Mais il en fait diminuer la production. Le nombre de réacteurs nucléaires en France ne peut donc être sensiblement diminué, ni par conséquent le risque nucléaire. Par contre, leur production d'électricité doit être réduite pour faire place à l'éolien (et au solaire photovoltaïque), ce qui les rend moins rentables. La seule façon de sortir du nucléaire en France serait pour l'essentiel de le remplacer par des centrales à combustibles fossiles, comme en Allemagne. Cela entraînerait alors des risques de nature différente mais dont on se rendrait compte rapidement qu'ils sont bien plus importants, si l'on consentait enfin à regarder objectivement les faits, comme ceux de la dangerosité de la pollution atmosphérique associée, et de l'accroissement considérable de nos émissions de CO₂.

- faire paraître dans les médias des annonces fracassantes les jours où l'éolien produit une part importante de la consommation, mais ne jamais parler des jours bien plus nombreux où il ne produit presque rien. On a même vu fin 2016 trois ministres faire ce genre d'annonce publiquement à la télévision, tromperie volontaire particulièrement grave pour des personnes en responsabilité.

- marteler que le prix de l'électricité éolienne (et de l'électricité photovoltaïque) est en baisse et sera bientôt compétitive avec l'électricité produites par les centrales commandables. D'une part on peut se demander pourquoi, si cette baisse est réelle, il est encore nécessaire après tant d'années de subventionner cette électricité avec des taxes sur la consommation qui ne cessent d'augmenter.

Mais en fait le problème n'est pas là : on a vu en effet que, du fait de l'intermittence, le développement de l'éolien (il en est de même du solaire photovoltaïque) ne pouvait que faire augmenter le prix de l'électricité pour les ménages, parce que son coût s'ajoute au coût des centrales commandables nécessaires à son fonctionnement, dont il n'a nulle part permis de réduire les capacités, augmente le coût du kWh produit par ces centrales parce qu'il les force à diminuer leur production sans que diminue le coût de leurs charges fixes, et augmente le coût de distribution de l'électricité parce que le développement de l'éolien (et du solaire photovoltaïque) doit nécessairement s'accompagner d'un développement des réseaux électriques. La baisse de son coût peut tout au plus ralentir cette augmentation de prix, qui est observée partout en Europe de l'Ouest.

Ce décervelage organisé est par son intensité l'aveu implicite que l'éolien ne pourrait pas convaincre par son intérêt intrinsèque. Il pose deux problèmes graves :

- Un problème éthique : Est-il moral dans un pays comme le nôtre que l'information de l'opinion sur ces questions si cruciales pour avenir soit systématiquement falsifiée par une partie très importante du monde politique et des médias ? Est-il moral également qu'un gouvernement et des élus, qui disposent s'ils le veulent de l'expertise nécessaire, se comportent de cette façon ?

- Un problème d'efficacité de la politique énergétique : c'est ce décervelage qui permet à la politique énergétique actuelle d'être vue favorablement par une grande partie de l'opinion, bien qu'elle soit conçue sans tenir compte des lois de la physique. La physique ne peut que reprendre un jour ses droits, mais en attendant, l'énorme gaspillage actuel détourne les investissements de réalisations bien plus efficaces pour la société.