

# Alimenter la France avec du Photovoltaïque et de l'Éolien ? Impossible ?

L'objectif de ce billet est de contribuer à la démonstration qu'il n'est pas impossible de couvrir nos besoins en énergie par un développement massif des EnR.

Il est avéré qu'un mix énergétique (d'énergies intermittentes) est d'autant plus robuste que l'on diversifie les sources d'énergie et leurs lieux d'implantation. C'est ce qui permet de réaliser un **foisonnement** entre toutes les sources pour garantir une sécurité d'approvisionnement.

Pour tendre vers un 100% d'EnR, il est bien entendu primordial de **réduire les consommations**, par des mesures d'**efficacité énergétique** et de **sobriété**, conformément aux hypothèses de Negawatt et de l'Ademe par exemple, sans oublier **la nécessité du stockage d'énergie sous différentes formes** ... toutes choses développées dans les deux billets : « [Une transition énergétique : pourquoi, comment](#) » et l'« [Éloge de la sobriété](#) » dont on ne reprendra pas ici les arguments.

Cependant, pour simplifier la présentation, on ne considérera ici que **l'éolien et le solaire**, à proportions égales. Rien n'empêcherait de modifier cette proportion et d'ajouter d'autres EnR comme la bio masse et l'hydraulique ... ce qui ne ferait que renforcer la robustesse du dispositif.

Pour rappel :

- la consommation TOTALE d'énergie finale en France est de l'ordre de 142 MTEP soit environ **1650 Twh**
- la production d'électricité en 2020 était de **450 TWh** (environ 36% du total de l'énergie finale)

Certains auteurs publient des études projectives de long terme :

- [Pourrait-on alimenter la France en électricité \*\*uniquement\*\* avec de l'éolien ?](#)
- [Pourrait-on alimenter la France en électricité \*\*uniquement\*\* avec du solaire ? Ou de la biomasse ?](#)

qui voudraient démontrer que décidément non, ce n'est pas possible. Ces études posent deux problèmes de méthode :

- pour une projection technique de long terme (10 ou 20 ans), il ne faut pas prendre en considération les rendements moyens actuels des dispositifs techniques, car ce n'est pas avec eux que l'on va équiper le pays : il faut considérer les meilleurs rendements actuels (que ce soit pour des éoliennes, des panneaux solaires...)
- il ne faut pas considérer un seul dispositif technique de production (que du solaire, ou que des éoliennes...) mais un mix énergétique, réparti préférentiellement dans les lieux de plus forte productivité. C'est ce qui permet d'assurer un foisonnement des sources et de ne pas saturer le paysage avec des éoliennes en grande densité ou avec des panneaux solaires envahisseurs.

Je cite :

... « Pour fournir 500 TW.h (soit 500.000 GW.h) avec des éoliennes fournissant 20 GW.h par km<sup>2</sup>, il faudrait « planter » une surface favorable de :  $490.000 \div 20 \approx 25.000 \text{ km}^2$  »

... « il faudrait donc couvrir de panneaux solaires une surface de ... **5.000 km<sup>2</sup>** environ. C'est certes considérable en valeur absolue, mais cela fait 1% de la surface du territoire, soit moins que ce qui est occupé par les bâtiments en France. »

On doit donc reprendre les calculs...

## Concernant le solaire ...

Les performances actuelles des panneaux solaires sont les suivantes :

- un panneau de 1,77 m<sup>2</sup> permet une puissance de 400 We, soit **0,226 kW / m<sup>2</sup>**
- le facteur de charge dans le sud avoisine 0,20 et on admettra une valeur moyenne (plutôt minorée) **proche de 0,12** en France.

Avec un facteur de charge de 0,12, l'énergie électrique produite par 1 m<sup>2</sup> de panneau est donc : 365 x 24 x 0,12 x **0,226 kWh/m<sup>2</sup>**, soit **une production de 237 kWh/m<sup>2</sup>/an**.

Donc 1 km<sup>2</sup> de panneau produit 237 GWh/an

Ou encore :

**1000 km<sup>2</sup> => 237 TWh/an ... 2000 km<sup>2</sup> => 474 TWh/an ... 5000 km<sup>2</sup> => 1185 TWh/an**

Avec les 5000 km<sup>2</sup> de panneaux solaires (cités précédemment) auxquels s'ajouterait la production actuelle d'électricité (450 Twh), on serait très proche de la consommation **TOTALE** d'énergie actuelle, sans avoir besoin de réfléchir à l'efficacité énergétique ni à la sobriété. Ce ne serait pas très raisonnable et assez envahissant.

### *Un petit calcul de l'emprise au sol.*

**Sachant que la production d'électricité en 2020 était de 450 TWh, supposons pour simplifier un besoin nouveau d'électricité d'environ 474 TWh**, mais qui ne serait produit que **pour moitié (soit 237 TWh)** par du solaire, l'autre moitié par de l'Éolien (ce qui n'interdirait pas d'autres EnR supplémentaires...).

Le choix de cette hypothèse de proportion ne change rien au fond du problème.

Dans ce cas de figure, comme on l'a vu plus haut, **il nous faudrait donc 1000 km<sup>2</sup> de panneaux solaires**.

Ça représente quoi ?

**La surface de la France** est d'environ 550.000 km<sup>2</sup>. Ces panneaux couvriraient donc 0,18 % de la surface de la France...

**Autre comparaison possible : la surface couverte des infrastructures** en France (toitures, routes...) est d'environ **25 000 km<sup>2</sup>**, c'est à dire **25 fois la surface de panneaux nécessaire**.

On peut aussi évaluer la surface occupée par les infrastructures de transport, qu'on évalue à 2,8%, dont près de 80% de **routes et autoroutes**, soit environ **12.000 km<sup>2</sup>**

<https://www.actu-environnement.com/ae/news/infrastructures-transport-impacts-eau-continuite-ecologique-22437.php4>

**C'est 12 fois la surface de panneaux nécessaire**.

On peut en particulier considérer la surface occupée **par les voies ferrées**.

Il y a en France environ 30.000 km de voies ferrées exploitées dont 16.000 km de lignes électrifiées et 14.000 km non électrifiées.

Leur électrification présenterait un intérêt majeur sur le plan environnemental (des économies d'énergie et du CO<sub>2</sub> gagné) ... mais avec un coût d'investissement important que la SNCF peut juger non-rentable dans bien des cas.

On pourrait donc considérer un « partage des coûts d'investissement » entre l'objectif électrification et l'objectif environnemental en faisant supporter la nouvelle ligne électrique par une structure métallique, installée au dessus de la voie ferrée pour supporter en même temps des panneaux photovoltaïques.

En supposant une emprise au sol de 3 mètres, un km de voie ferrée permettrait de disposer de 3000 m<sup>2</sup> de panneaux, soit environ 1700 panneaux de 400 W, soit 680 KW. Avec un facteur de charge de 0,12, l'énergie électrique produite sur un an pour 1 km de voie ferrée serait d'environ 715 MWh = 0,715 GWh...

En recouvrant environ **14.000 km de voie ferrée**, on produirait **10 TWh/an ...** à

rapprocher de la production moyenne d'**un réacteur nucléaire** qui est de **6 Twh/an**.

On voit bien qu'il n'est aucunement besoin de condamner des surfaces agricoles en les couvrant de panneaux solaires ... encore que l'INRA a lancé une expérimentation sur des terres plantées de fruitiers et de vignes et l'ADEME a publié en 2022 les résultats d'une première étude : [Photovoltaïque et terrains agricoles : un enjeu au cœur des objectifs énergétiques](#) qui démontre l'intérêt d'une couverture du sol par des panneaux, contribuant à protéger les cultures d'un excès d'ensoleillement et de l'évaporation qui va avec. L'ADEME promeut ainsi l'**agrivoltaïsme** sous cette définition très restrictive : << l'agrivoltaïsme se distingue par le(s) service(s) apporté(s) en réponse à une problématique agricole et par la synergie qu'il présente entre production agricole principale et production PV secondaire.>>

Ces résultats sont confirmés dans une étude de 2023: « [Agrivoltaïsme : avantages et inconvénients d'installer des panneaux solaires dans les champs](#) »

La question de l'emprise au sol des panneaux solaires **est donc bien une fausse question**, qui se pose à cause d'investisseurs privés qui ont des exigences de rentabilité démesurées (car les panneaux au sol reviennent moins cher)

### ***Se pose également la question des matériaux***

Actuellement, les panneaux à base de **silicium** représentent plus de 90% de la production mondiale. Et la plupart des composants d'un module solaire (**jusqu'à 95 % de certains matériaux semi-conducteurs**) dont le verre et de grandes quantités de métaux ferreux et non ferreux peuvent être récupérés et recyclés. Cependant, **le silicium est un des principaux constituants de la géosphère et de la technosphère**, mais c'est la Chine qui est depuis plusieurs décennies le plus gros producteur de silicium métal.

C'est pour cette dernière raison (géopolitique) que le silicium métal a été classé parmi les matières premières critiques par la Commission européenne en 2014 et 2017. Les principaux déterminants invoqués ont été la forte concentration du marché en Chine ainsi que l'importance économique du silicium métal pour l'économie européenne (secteurs aluminium, silicones, solaire, et microélectronique).

<http://www.mineralinfo.fr/ecomine/silicium-element-chimique-tres-abondant-affinage-strategique>

## ***Comment produire le complément d'électricité en éolien ?***

Les éoliennes de dernière génération (Haliade X) ont une puissance de l'ordre de 13 MW qui va passer à **14 MW**, de même que celle de Siemens Gamesa qui affichera de **14 à 15 MW**.

L'Haliade X a un facteur de charge de 0,63 en Mer du Nord.

Accordons lui un **facteur de charge de l'ordre de 0,45 sur nos côtes**.

L'énergie produite annuellement serait donc :  $24 \times 365 \times 0,45 \times 13$  MWh, ce qui donne de l'ordre de 51000 MWh, **soit 51 GWh**.

Pour fabriquer les 237 TWh évoqués plus haut, il faudrait donc **installer 4650 éoliennes de ce type**.

***En échelonnant cette fabrication sur 20 ans, il faudrait fabriquer et installer de l'ordre de 232 éoliennes par an.***

Concernant la production, il faut là encore répondre à la question des matériaux. Une telle éolienne comporte environ 500 tonnes de béton et 250 tonnes d'acier. Pour 250 éoliennes, il faut donc :

- 125.000 tonnes de béton, à rapporter à une production annuelle de 16 millions de tonnes (en 2018) => **0,8% de la production**
- 62.500 tonnes d'acier, à rapporter à une production annuelle de 16 millions de tonnes (en 2018) => **0,4% de la production**

Ces quantités seraient donc tout à fait supportables. Reste la question des terres rares dont la rareté n'est pas celle de leur présence sur Terre mais celle de leurs propriétés physiques... La question est là encore **géopolitique**.

« La carrière commerciale de **ce monstre de 750 tonnes** semble bien engagée.

L'Haliade-X vient d'être retenue par le groupe danois Ørsted, qui prévoit d'en installer une **centaine** dans deux de ses parcs américains, au large du Maryland et du New Jersey.

Leurs mises en service sont respectivement prévues en 2022 et en 2024, après les autorisations réglementaires et la signature du contrat final. Et **300** turbines pour l'Angleterre... »

<https://www.lesechos.fr/pme-regions/pays-de-la-loire/saint-nazaire-lusine-deoliennes-ge-passe-aux-grandes-series-1144267>

### ***Est-ce installable ?***

Pour un rendement optimum la distance entre 2 éoliennes ne doit pas être inférieure à 2 fois le diamètre du cercle engendré par la rotation des pales.

Pour une éolienne Haliade X, ce diamètre est d'environ 200 m., d'où un intervalle de l'ordre de 400 m entre éoliennes.

L'implantation annuelle de 232 éoliennes nécessiterait donc une rangée d'éoliennes alignées sur un peu plus de 90 km.

Ça peut paraître énorme, mais c'est à mettre en regard

- avec notre linéaire côtier : **5 853 km pour la France métropolitaine**, basée sur le trait de côte SHOM à l'échelle 1/1 000 000

(Manche: 1759 km - Atlantique: 2400 km - Méditerranée: 1694 km dont la Corse: 688 km)

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Littoral\\_fran%C3%A7ais](https://fr.wikipedia.org/wiki/Littoral_fran%C3%A7ais)

- avec une autre façon d'évaluer cet « encombrement » en le comparer aux distances à vol d'oiseau : ( Brest-Calais = 540 km - Brest-Biarritz = 1200 km - Perpignan-Nice = 1200 km ), **soit un total de 2940 km**.

Il va sans dire que l'ensemble des éoliennes ne seraient pas alignés sur une seule rangée mais regroupées dans des parcs qui optimiseraient leur production.

Et d'autre part, il ne devrait pas être implanté une seule catégorie d'éoliennes offshore ni une seule catégorie d'éoliennes terrestres...

Mais cette projection permet d'indiquer **des ordres de grandeur**.

Elle ne traite qu'un aspect particulier du recours aux EnR. Pour le reste, on pourra se référer à d'autres contributions au débat :

[Bifurquons : pour une transition énergétique](#) et [Éloge de la sobriété](#)

Cette projection ne considère pas l'ensemble des problèmes techniques, comme la stabilité en fréquence du réseau. Des [solutions sont évoquées dans le document de l'AIE](#).

## ***Alors, impossible?***

L'hypothèse de travail dans ce billet est une **production nouvelle** d'électricité renouvelable d'environ **474 Twh/an**.

Cette production s'ajouterait à la production actuelle d'EnR (électrique ou pas) d'environ **273 Twh/an** qui représentent actuellement 16,6% de la consommation finale d'énergie.

Avec ces hypothèses, la production d'énergie **renouvelable** (donc sans le nucléaire) serait d'environ **747 Twh**, c'est à dire un peu moins de la moitié de la consommation totale actuelle (qui est de 1650 Twh).

Sous réserve d'une réduction des consommations (par efficacité énergétique et sobriété), et avec un transfert nécessaire **vers l'énergie électrique renouvelable**, cet ordre de grandeur des productions nous placerait sur une trajectoire de sortie des énergies fossiles et permettrait de planifier la sortie du nucléaire. **Pas impossible donc...**

L'objectif de long terme étant défini, reste à préciser une chronologie (un scénario) pour satisfaire les étapes et objectifs intermédiaires : au boulot !!!

jeanpaulcoste@free.fr