

Le véritable bilan d'une éolienne terrestre

De quoi est faite une éolienne terrestre ?

Une éolienne terrestre de 120 mètres de haut et de durée de vie réelle de 25 ans est composée de :

- Un socle : 800 t à 1500 t de béton + 50 t de ferrailage : non recyclable.
- Un mât en acier la plupart du temps (sinon en béton) de 80 t : recyclable.
- De 3 pales de 90 mètres : elles sont en composite, soit de la fibre de verre, du carbone et de la résine polyester mais aussi du balsa : non recyclable.
- Un convertisseur d'énergie mécanique en énergie électrique à base d'aimants permanents. 200 kg de terres rares pour une éolienne terrestre et 900 kg pour une éolienne marine : non recyclable.

Pour plus d'information :

http://portail2.reseau-concept.net/Upload/siceco/fichiers/guide_enr_eolien.pdf

Un peu de chimie et de géologie

La fibre de verre est un mélange d'aluminium (**Al**, concentration 82 000 ppm), de silicium (**Si**, concentration 277 100 ppm), de calcium (**Ca**, concentration 41 000 ppm), de manganèse (**Mn**, concentration 950 ppm), de bore (**Br**, concentration 950 ppm), de titane (**Ti**, concentration 5600 ppm) et de zirconium (**Zr**, concentration 165 ppm).

La résine polyester est obtenue par plusieurs processus chimiques en cascade nécessitant du pétrole. L'extraction des minéraux nécessitent des pelleteuses fonctionnant au diesel. Sans pétrole, pas d'éolienne.

Les terres rares sont le néodyme (**Nd**, concentration 42ppm, masse volumique 7,008 g/cm³) et dysprosium (**Dy**, concentration 5,2ppm, masse volumique 8,551 g/cm³).

Ce qui nous importe le plus sont les terres rares parce que leur concentration en ppm sont les plus faibles.

- La masse volumique terre est 2,9 g/cm³=2,9 t/m³.
- 1 tonne de terre = 1000000 g = $42 \cdot (7,008 / 2,9) = 101,49$ g de néodyme.
- 1 tonne de terre = 1000000 g = $5,2 \cdot (8,551 / 2,9) = 15,33$ g de dysprosium.

1 éolienne terrestre = 100 kg de néodyme + 100 kg de dysprosium = $100000 / 101,49 + 100000 / 15,33 = 985 + 6523 = 7\,508$ t de terre brassée = $2\,588$ m³ de terre brassée = $2,588$ ha de terrain à mettre à nu sur 10 mètres de profondeur. Donc plus de vie sur ce terrain parce que plus d'écosystème.

Calcul de l'espace nécessaire à une éolienne terrestre sur son cycle de vie

Comme une éolienne terrestre comporte des pales de 90 m, la distance entre les éoliennes doit être 900 m : c'est l'écart nécessaire permettant au tube d'air frappant les pales de se reconstituer en terme d'équilibre des vents au regard des turbulences au bout des pales. <https://energieplus-lesite.be/theories/eolien8/aerodynamique-des-eoliennes/>

Donc une éolienne terrestre occupe à l'exploitation une surface de $900 \text{ m} * 900 \text{ m} = 81 \text{ ha}$ dégagée : pas de forêt, pas d'immeuble, pas de colline, pas de centrale nucléaire (changement des vents par la température des tours de refroidissement).

Une éolienne terrestre coûte en place 2,588 ha à l'investissement +81 ha à l'exploitation = 83,588 ha en tout.

L'impact sur la forêt

Mais cette surface est couverte pour partie de forêt : forêt qui va se reconstituer au cours du temps pour la partie investissement mais pas pour la partie exploitation tant que l'éolienne est présente.

A défaut d'être plantée sur une zone où il y a de la forêt, elle occupe de la place qui pourrait être occupée pour autre chose (agriculture, élevage, ville, industrie, etc.) et qui sera prise ailleurs pour partie sur la forêt. Donc c'est finalement équivalent par transfert.

La couverture des terres émergées habitables est à 33% de forêts. Mais l'extension de l'homme sur ces terres émergées est à 66% de forêts : l'homme a commencé à vivre où il y avait des prairies puis plus il se déploie, plus c'est au détriment des forêts.

La place disponible en **France** métropolitaine commençant à manquer, puisqu'il reste moins de 10% du territoire disponible, un projet nécessite souvent une déforestation.

C'est le cas d'une ferme biologique dans les **Alpes** pour élever des chèvres puis produire des fromages ; du prototype de **ITER** de réacteur à fusion nucléaire ; du projet d'éoliennes à **Nancray**. En ce cas, c'est 100% du coût **CO2** qu'il faut imputer et non entre 33% et 100%.

Une forêt absorbe 5 t de **CO2** à l'hectare par an. Il faut donc tenir compte de l'impact de la déforestation effective pour la part investissement et la part exploitation en surface occupée par une éolienne terrestre. Sinon, le bilan carbone est totalement faux.

Le vrai bilan CO2 d'une éolienne terrestre

Les 2,588 ha à l'investissement coûtent en surface forestière entre $33\% * 2,588 \text{ ha} = 0,85 \text{ ha}$ et $66\% * 2,588 \text{ ha} = 1,71 \text{ ha}$ de forêt. Au pire 2,588 ha. Il faut 200 ans pour

reconstituer une forêt dense. En 25 ans, elle s'est reconstituée à hauteur de $25/200=12,5\%$ en terme de masse biologique, donc de **CO2** absorbé.

Donc la perte est de $100\%-12,5\%=87,5\%$ par rapport à ne pas avoir déforesté. En effet, le coût n'est pas seulement ce qui a été émis mais aussi ce qui n'a pas été absorbé. La balance des flux de **CO2** en somme.

Le coût en **CO2** pour l'investissement en déforestation est entre $87,5\% * 0,85 \text{ ha} * 5 \text{ t} * 25 \text{ ans} = 92,97 \text{ t}$ et $87,5\% * 1,71 \text{ ha} * 5 \text{ t} * 25 \text{ ans} = 187,03 \text{ t}$ pour une éolienne terrestre.

Les 81 ha à l'exploitation coûtent en surface forestière entre $33\% * 81 = 26,73 \text{ ha}$ et $66\% * 81 = 53,46 \text{ ha}$ de forêt. Au pire 81 ha comme à **Nancray**. Le coût en **CO2** pour l'exploitation en déforestation est entre $26,73 \text{ ha} * 5 \text{ t} * 25 \text{ ans} = 3\,341,25 \text{ t}$ et $53,46 \text{ ha} * 5 \text{ t} * 25 \text{ ans} = 6\,682,5 \text{ t}$ pour une éolienne terrestre. Au pire $81 \text{ ha} * 5 \text{ t} * 25 \text{ ans} = 10\,125 \text{ t}$.

1 pelleteuse peut travailler 400 t de terre à l'heure et consomme 50 l de diesel à l'heure. Les 7 508 t de terre à brasser nécessitent 938 l de diesel. Avec le convoyage du camion, on peut doubler. 2 000 litres de diesel, qui vont produire $2,6 \text{ kg} * 2000 \text{ l} = 5,2 \text{ t}$ de **CO2**.

Produire 1 t d'acier nécessite d'émettre 1,8 t de **CO2**. Produire 1 t de béton nécessite d'émettre 0,8 t de **CO2**. Donc pour l'éolienne terrestre c'est encore $(80+50)*1.8 + [800; 1500]*0.8 =$ entre 874 t de 1 434 t **CO2** en plus.

Au final, une éolienne terrestre c'est 5,2 t pour l'extraction minière + [874; 1 434] t pour la construction + [92,97; 187,03] t pour l'investissement + [3 341,25 ; 6 682,5] t pour l'exploitation = entre 4 313,42 t et 8 308,73 t de **CO2** à amortir sur les 25 ans de sa durée de vie. Au pire comme à **Nancray**, c'est 5,2 t pour l'extraction minière + [874; 1 434] t pour la construction + [92,97; 187,03] t pour l'investissement + 10 125 t pour l'exploitation = entre 11 097,17 t et 11 751,23 t de **CO2** à amortir sur les 25 ans de sa durée de vie.

Une éolienne terrestre coûte en équivalent **CO2** entre $4\,313,42 \text{ t} / 25 \text{ ans} = 172,54$ et $8\,308,73 \text{ t} / 25 \text{ ans} = 332,35 \text{ t}$ par an. Au pire comme à **Nancray**, entre $11\,097,17 \text{ t} / 25 \text{ ans} = 443,88 \text{ t}$ et $11\,751,23 \text{ t} / 25 \text{ ans} = 470,05 \text{ t}$ par an. Sans prendre en compte son transport, le forage pour sa base, le coût en énergie des processus chimiques. Donc ce calcul est bien minimisé même s'il comporte l'essentiel. Disons qu'à 10% c'est correct.

Comparaison du bilan carbone réel d'une éolienne terrestre

Une éolienne terrestre produit 2,5 MW crête soit environ $17\% * 2,5 = 0,42 \text{ MW}$ réel. Sur 1 an elle délivre $0,42 * 24 * 365 = 3679 \text{ MWh}$ contre 172,54 à 332,35 t de **CO2**. Donc le bilan énergie vs **CO2** devient $172,54 \text{ t} / 3679 \text{ MWh} = 0,046 \text{ t}$ à $332,35 \text{ t} / 3679 \text{ MWh} = 0,090 \text{ t}$ de **CO2** par MWh. Au pire comme à **Nancray**, $443,88 \text{ t} / 3679 \text{ MWh} = 0,121 \text{ t}$ à $470,05 \text{ t} / 3679 \text{ MWh} = 0,128 \text{ t}$ de **CO2** par MWh.

Donc :

- Peu de déforestation (ce qui est peu probable) : 0,046 t / MWh = 46 g / kWh.
- Déforestation moyenne (ce qui est le plus probable) : 0,090 t / MWh = 90 g / kWh.
- Déforestation forte comme à **Nancray** (ce qui est de plus en plus probable) : 0,128 t / MWh = 128 g / kWh.

Les centrales thermiques au charbon ont un bilan énergie vs **CO2** de 820 g par kWh. Et officiellement les éoliennes ont un bilan énergie de 11 g vs **CO2**. Ceux qui ont fait ces estimations, pro **ENR**, ont eu la main lourde sur les centrales thermiques à charbon et la main bien trop légère sur les éoliennes terrestres et marines. Confère https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_annex-iii.pdf page 1335.

L'erreur intentionnelle est au minimum de $(46-11)/11=318\%$ pour une déforestation faible, $(90-11)/11=718\%$ pour déforestation moyenne et $(128-11)/11=1064\%$ pour une déforestation forte comme à **Nancray**.

Finalement, une éolienne terrestre n'est pas mieux que MOYENNE $(90; 128)/820 = 13,3\%$ qu'une centrale à charbon en étant très gentil du point de vue du bilan **CO2**. Et elle est bien moins placée qu'une solution nucléaire à 12 g / kWh ou hydraulique à 24 g / kWh. Même le gaz avec 352 g / kWh à 480 g / kWh commence à être compétitif en terme d'ordre de grandeur.

Les autres problèmes propres aux éoliennes terrestres

Il y a d'autres problèmes propres aux éoliennes terrestres dont il faut tenir compte :

- La perte d'humidité et son impact du fait de la déforestation.
- Les nuisances lumineuses et sonores des éoliennes.
- La course au balsa.
- L'instabilité du courant produit.
- Le coût réel au kWh en intégrant toutes les subventions.

La perte d'humidité

Si une forêt absorbe 5 t à l'hectare de **CO2**, dans le même temps, elle émet 5 t à l'hectare d'oxygène et $500 * 5 t = 2 500 t$ à l'hectare de vapeur d'eau par an via l'évapotranspiration. Déforester coupe aussi les flux d'oxygène et de vapeur d'eau.

La vapeur d'eau est le gaz de l'atmosphère qui est le plus difficile à chauffer : 2 010 J/(kg*K) pour **H2O** vapeur vs 1 025 J/(kg*K) pour **N2** présent à 78% et 918 J/(kg*K) pour **O2** présent à 21% de l'air sec.

La capacité thermique de l'air sec était de 1 006,133 J/(kg*K) en 1850 mais de 1 006,147 J/(kg*K) en 2020 du fait de +0,0125% de **CO2**. Comme il y a eu déforestation, le taux d'humidité a diminué faute d'évapotranspiration constante. La perte d'humidité de 1850 à 2020 est d'environ 7%, dont 6% à cause de la déforestation.

Ainsi, la capacité thermique de l'air humide était de 1 136,674 J/(kg*K) en 1850 mais de 1 100,343 J/(kg*K) en 2020. A puissance solaire constante, cela occasionne un réchauffement climatique moyen réparti sur toute la **Terre** de +0,282 °C.

Moins d'humidité dans l'air veut dire aussi moins probable d'atteindre le seuil de pression de vapeur saturante à partir duquel se forment les nuages. En français de tous les jours, plus de déforestation implique moins de nuages qui nous servent d'ombrelles en renvoyant une partie du rayonnement solaire, donc plus de réchauffement climatique : +0,126°C.

Le coût de la déforestation est de 0,282 °C + 0,126 °C = 0,408 °C sur les 1,2°C, soit 34 %. A ce jour, il y a en 170 ans près 25 038 067 km² de déforestation.

Un parc de 60 éoliennes terrestres coûte plus 60 * 81 ha = 4 860 ha = 48,6 km², soit en réchauffement climatique 0,408 °C * (48,6/25 038 067) = 0,0019 micro °C au niveau mondial mais beaucoup plus au niveau local : de l'ordre de 0,1°C, soit 0,1°C / 1,2 °C = 8,33% du réchauffement climatique actuel.

La perte en pluie

En fait, le plus important, c'est le coût en perte de pluie : 2 500 t * 81 ha = 202,5 kt de pluie sur des territoires sous le vent dominant du parc de 60 éoliennes. Petit à petit, le parc d'éoliennes apporte la sécheresse quelque par sur le continent à quelques centaines de km de lui. Comme toute opération d'aménagement du territoire qui nécessite une déforestation.

Les nuisances lumineuses

Les pales d'une éolienne terrestre masquent périodiquement le soleil pendant une fraction de seconde. Comme une éolienne tourne de 10 à 15 tours par minute, avec 3 pales, la fréquence est entre de 60/(15*20)=1,33 s et 60/(10*3)=2 s. Cet effet stroboscopique est source d'inconfort, voire de stress, pour la faune et la flore qui se situent sous l'éclairage.

Pensez à l'effet des éclipses sur les animaux qui croient que la nuit tombe à un moment inattendu de la journée : ils sont déboussolés. Sauf que cela n'arrive qu'une fois toutes les n années. Avec éoliennes, c'est en continu.

Les nuisances sonores

Une éolienne terrestre génère 3 ondes de fréquence d'environ 15 Hz. La fréquence audible pour l'homme doit être supérieure 20 Hz. Ces infrasons non audibles par nos

oreilles ne sont pas pour autant non perçus par d'autres capteurs biologiques, en particulier la peau.

Les infrasons à 16,38 Hz produits par les éléphants, non audibles par les humains, leur servent à communiquer à plus de 10 km. Ils les émettent pas la trompe et reçoivent celles émises par leurs congénères par les pattes, ces ondes étant transmises par le sol. http://www.snv.jussieu.fr/zoologie/Actualites/Actualites-Zoologiques/Documents/Infrasons%20_elephant.pdf

Le seuil d'effet sur l'homme d'une onde infrason serait 76 dB. La puissance sonore d'une onde émise par une éolienne terrestre est de l'ordre de 70 à 80 dB, mais par résonance, cela peut atteindre 120 dB, soit $(120-76)/76 = +58\%$. https://www.suisse-eole.ch/media/redactor/Eoliennes_infrasons_et_sante_-_Bayerisches_Landesamt_fuer_Umwelt_version_2014.pdf

Il y a bien un problème de santé publique pour les hommes. Et pour certains animaux, qui y seraient encore plus sensibles : les chevaux et les vaches par exemple. C'est pour cela que certains de ces animaux refusent de s'alimenter, en particulier de boire parce que l'eau vibre, au point de se laisser mourir de soif.

Selon la nature du sol, ces ondes y sont propagées sur des kilomètres sans être amorties. Le calcaire par exemple. https://www.paysage-libre.ch/wp-content/uploads/2020/09/RAPPORT_infrasons_septembre_2020.pdf

Il y a des effets des infrasons non reconnus par la médecine mais bien réels visiblement : la panique, la dépression, la nausée et la céphalée. Cela est ressenti par tous les mammifères, donc pas seulement les hommes et les éléphants. Aussi les chevaux, les vaches, les cochons, etc. https://fr.wikipedia.org/wiki/Infrason#Effets_des_infrasons

La course au balsa

Les pales des éoliennes doivent être à la fois très légères, très solides et aérodynamiques. Moins elles sont légères, plus elles auront d'inertie, moins elles tourneront vite et moins elles produiront d'électricité. Le critère de solidité est évident pour résister aux vents puissants.

La solution trouvée a été de faire une ossature en balsa, un bois très léger et bien résistant. Ainsi, déployer en masse des éoliennes, c'est avant de les fabriquer faire la course au balsa, qui est un bois exotiques provenant de forêts intertropicales. De façon indirecte, les éoliennes terrestres ou marines contribuent à la déforestation en **Amazonie**, ce qui n'a pas été pris en compte dans le bilan **CO2**. <https://www.contrepoints.org/2021/12/02/415697-arbre-balsa-lamazonie-menacee-par-les-eoliennes>

L'instabilité du courant produit

La quantité d'électricité produite par une éolienne est fonction de la vitesse du vent et elle évolue selon son cube. Ainsi sont les lois de la physique. Une éolienne est rentable environ à partir de 50 km/h de vent.

https://eolienne.f4jr.org/eolienne_etude_theorique

Donc avant d'installer un parc d'éoliennes, il faut regarder qu'elle est la répartition de la vitesse du vent au cours de l'année à 100 m du sol. S'il n'y a que 10 jours de vents assez puissants par an, il est évident que l'installation sera non rentable. Pour connaître la vitesse au 100 m du sol, une bonne pratique est de prendre la vitesse au sol et de multiplier par 1,5. Exemple pour **Nancray** disponible pour la plupart des communes :

https://www.meteoblue.com/fr/meteo/historyclimate/climatemodelled/nancray_france_2991004

- Si le vent baisse de 5 km/h, soit $-5 \text{ km/h} / 50 \text{ km/h} = -10\%$, la puissance électrique de l'éolienne baisse de $100\% - (100\% - 10\%)^3 = 27,1\%$.
- Si le vent augmente de 5 km/h, soit $+5 \text{ km/h} / 50 \text{ km/h} = +10\%$, la puissance électrique de l'éolienne augmente de $(100\% + 10\%)^3 - 100\% = 33,1\%$.

Ainsi, en 1/4 d'heure, le battement de vent étant de $[-5 \text{ km/h} ; +5 \text{ km/h}]$, le battement de la puissance électrique injectée sur le réseau est de $33,1\% + 27,1\% = 60,2\%$. Pour gérer cette volatilité, il faut une source d'énergie alternative qu'on peut solliciter sans limite avec au moins la même vitesse de réaction : le 1/4 d'heure, soit $4 \times 24 = 96$ fois par jours !

Cette instabilité, qui est le fruit de Monsieur **Éole**, pour lequel nous avons aucun pouvoir de coercition, rend cette source d'énergie aléatoire et non pilotable. Cela peut fonctionner ou pas. Donc il faut adapter sa consommation à la production (passer l'aspirateur, avoir la lumière, lancer une lessive, manger chaud, conserver au congélateur sa nourriture, réaliser une opération chirurgicale urgente, etc.) alors que jusqu'à présent nous avons adapté notre production à la consommation.

60 éoliennes, cela fait une puissance de $60 \times 2,5 \text{ MW} = 150 \text{ MW}$. La variation à compenser est de $60,2\% \times 150 \text{ MW} = 90,3 \text{ MW}$.

Si nous considérons les centrales nucléaires, une tranche a une capacité de 1 300 MW qui sait varier de 1% à la minute, donc 15% au 1/4 d'heure, soit $15\% \times 1 300 \text{ MW} = 195 \text{ MW}$. Sauf que le nombre de changements de puissance est limité pour ne pas provoquer une usure précoce des tuyaux et des vannes. Donc le nombre de montées et de descentes en charge est limité dans l'année.

En plus, une tranche de centrale nucléaire de 1 300 MW qui est disponible à 60 % est équivalente à une centrale à charbon de puissance équivalente ou aussi à $(60\% \times 1 300 \text{ MW}) / (17\% \times 2,5 \text{ MWc}) = 1 836$ éoliennes. Ces éoliennes occuperaient 148 658 ha

alors que la tranche de centrale nucléaire occupe 20 ha. La densité énergétique varie de 1 à 7 500 environ !

Il faut donc se tourner vers une autre solution de production d'électricité pour compenser les variations de charges. Le charbon étant banni, l'hydraulique étant limité, il reste essentiellement le gaz. En moyenne mensuelle sur 2019, l'éolien a produit 3 839 GWh tandis que le gaz 4 116 GWh. En 2020, l'éolien a produit 6 110 GWh tandis que le gaz 3 373 GWh. Selon **Réseau de Transport d'Electricité (RTE)**.

En moyenne, pour 100 MW de puissance éolienne terrestre installée et raccordée, il faut de l'ordre de 50 MW de puissance à gaz installée pour compenser. Cela alourdit le coût de l'électricité par éolienne à la fois sur le plan climatique et à la fois sur le plan économique.

Compte tenu que le gaz a un coût en **CO2** d'environ 352 g / kWh à 480 g / kWh, il faut en ajouter la moitié au bilan **CO2** précédent. Donc :

- Peu de déforestation (ce qui est peu probable) : 46 g / kWh + MOYENNE(352; 480)/2 g / kWh = 462 g / kWh.
- Déforestation moyenne (ce qui est le plus probable) : 90 g / kWh + MOYENNE(352; 480)/2 g / kWh = 506 g / kWh.
- Déforestation forte comme à **Nancray** (ce qui est de plus en plus probable) : 128 g / kWh + MOYENNE(352; 480)/2 g / kWh = 544 g / kWh.

Ainsi, une solution de production d'électricité par éolienne terrestre est finalement pire qu'une solution à gaz et n'est plus très loin d'une solution à charbon avec un bon rendement et de bons filtres en terme de bilan **CO2** !

Le coût réel au kWh en intégrant toutes les subventions

Les parcs éoliens sont fortement subventionnés par l'État au nom de la transition énergétique. Cela a déjà coûté 120 milliards d'Euro aux **Français** prélevés sous forme d'impôts et de taxes, dont la **Contribution au Service Public de l'Électricité (CSPE)** qui pèse 0,0225/0,16=15% ou la taxe **Taxe Intérieure de Consommation sur les Produits Energétiques (TICPE)** qui pèse 0,6142 € / l d'essence et 44,19 € / l de diesel depuis 2014 https://fr.wikipedia.org/wiki/Taxe_int%C3%A9rieure_de_consommation_sur_les_produits_%C3%A9nerg%C3%A9tiques. Sans compter la taxe carbone qui s'est ajoutée depuis.

Ces coûts ne sont pas les coûts directs payés par le consommateur qui payent les coûts indirects par des impôts ou des taxes comme énoncés précédemment. Selon la **Commission de Régulation de l'Energie (CRE)**, le coût réel des **Energies Renouvelables (ENR)** serait de l'ordre de 1.1€ / kWh alors qu'il est facturé 0,16 € / kWh, sachant que le coût réel du nucléaire avant coût marketing / ventes / RH est 0,495 € / kWh. Soit $(1,1 - 0,16) / 0,16 = 5,875$ fois plus ! <https://www.cre.fr/Documents/Publications/Rapports-thematiques/couts-et-rentabilite-des-enr-en-france-metropolitaine>

Pourquoi le prix de l'électricité flambe en **Union européenne** ?

Parce que nous déployons de plus en plus de parcs d'éoliennes terrestres et demain marines :

- Le coût économique au kWh de l'éolien est très élevé en intégrant les subventions financées par les taxes perçues sur l'électricité, l'essence, le diesel et le gaz.
- Les éoliennes nécessitent des centrales à gaz pour compenser la volatilité de la production électrique. Donc il y a une tension sur le besoin en gaz qui provient de l'**Algérie**, la **Norvège** ou de la **Russie**. Mais la **Norvège** consomme plus de gaz parce qu'elle a plus d'éoliennes et le gazoduc **North Stream 2**, fort contesté par des innocents, est en retard. En plus de la tension sur la demande, il y a une tension sur le prix.
- Le gaz étant une énergie fossile, elle est frappée de la taxe carbone décidée par l'**Union européenne** qui ne cesse de s'alourdir avec le temps.

Avec la politique à base d'éolienne, les trois raisons évoquées ne peuvent que rendre pérenne l'augmentation importante du prix de l'électricité ainsi que notre dépendance géopolitique à la **Russie** qui se frotte les mains.

Utopie et réalité

100% d'éolien est-ce possible ?

La réponse est non puisqu'il faudrait environ 2/3 en éolien et 1/3 en gaz pour compenser. Mais faisons comme si pour l'exercice.

La **France** a consommé 600 TWh en 2019, dernière année normale, selon **Réseau de Transport d'Electricité (RTE)**. Une éolienne terrestre produit 2,5 MW au rendement de 17%, donc $2,5 \text{ MW} * 17\% * 365 * 24 = 3\,723 \text{ MWh}$. Il faut donc $600\,000\,000 / 3\,723 = 161\,160$ éoliennes.

Une éolienne nécessite 900 m x 900 m soit 81 ha. Donc pour ces éoliennes, il faudrait $81 \text{ ha} * 161\,160 = 13\,053\,989 \text{ ha}$. Avec 10% pour les accès, quasiment 15 millions d'hectares.

L'électricité, c'est 22% de l'énergie consommée et 78% sont fossiles. Mais les fossiles dégagent de la chaleur à hauteur de 50% et sont employées comme telles pour le chauffage ou la cuisson par exemple. Donc en tout électrique on passerait environ de 100% à $22\% + (34\%/2 \text{ pour moteur} + 34\% \text{ pour chauffage}) = 22\% + 17\% + 34\% = 83\%$.

Pour tout basculer en électricité produite par des éoliennes terrestres, il faudrait une surface de $83\% / 22\% * 15 \text{ millions ha} = 56 \text{ millions ha}$.

La **France** métropolitaine, c'est 55 millions d'hectares. Cela ferait environ 102% du territoire à couvrir. En fait la place restante en **France** métropolitaine en conservant nos

forêts (34%) est de l'ordre de 10% (au pire avec beaucoup de saccage de la nature 20%). Soit 5,5 millions (au pire 11 millions) d'hectares de disponibles à défigurer. Soit pratiquement 5,5 / 56 millions ha = 1/10 de la place nécessaire.

En empilant les éoliennes sur 10 couches, on pourrait y arriver : la dernière couche serait à $900 \text{ m} * 8 = 7,6 \text{ km}$ d'altitude, soit juste au dessous de l'altitude à laquelle vole les avions. A supposer que cela soit faisable.

Produire 50% d'électricité avec des éoliennes terrestres est totalement impossible. En combinant avec les éoliennes marines, c'est guerre plus possible, même en saccageant tout.

Avons nous assez de terres rares ?

Si le néodyme et le dysprosium sont appelées terres rares, ce n'est pas pour rien : leur concentration est faible dans la croûte terrestre, même si un important gisement a été découvert au large du **Japon** récemment.

Il faut 200 kg de néodyme et dysprosium par éolienne et il faudrait 160 000 éoliennes au bas mot pour la **France**, donc environ $0,2 \text{ t} * 160\ 000 = 32\ 000$ tonnes de néodyme et dysprosium pour les éoliennes françaises.

Comme le **PIB** de la **France** vs le **PIB** monde est de 3,45%, il faudrait environ $32\ 000 \text{ t} / 3,45\% = 927\ 536 \text{ t}$, soit à peu près 1 million de tonnes de néodyme et dysprosium nécessaires.

Il y a 16 millions de tonnes de réserves évaluées d'oxyde de 17 terres rares. Soit environ $(2*16)/17 = 1,88$ million de tonnes de réserve d'oxyde de néodyme et d'oxyde de dysprosium.

- Oxyde néodyme **Nd2O3** : proportion néodyme $2*60/(2*60+3*16) = 71,4\%$.
- Oxyde dysprosium **Dy2O3** : proportion néodyme $2*66/(2*66+3*16) = 73,3\%$.

La moyenne des proportions est 72,4 %. $1,88*72,4\% = 1,38$ million de tonnes de réserve de néodyme et dysprosium. Nous ne disposerions que de $1,38 \text{ Mt} / 0,927 \text{ Mt} = 148\%$ des terres rares nécessaires pour produire une énergie 100% éolienne au niveau mondial durant 25 ans. Donc déjà il faudrait apprendre à les recycler avec 0% de perte, ce que nous ne faisons absolument pas !

Nous ne produisons à ce jour que 170 milliers de tonnes des 17 terres rares par an. Soit environ 20 milliers de tonnes de néodyme et dysprosium par an. A ce rythme il faudrait $0,927 \text{ Mt} / 20 \text{ kt} = 46$ ans. Alors que l'objectif est 2050 soit dans 30 ans.

Et de toute façon, avant l'atteinte de ces 30 ans ou 46 ans, il faudrait déjà renouveler tous les parcs éoliens parce que la durée de vie d'une éolienne n'est que de 25 ans en pratique.

Au delà des éoliennes

Fallait-il fermer Fessenheim ?

Fessenheim est une centrale nucléaire comportant deux tranches de 880 MW disponibles à 60% du temps. Soit une puissance effective de $(2 \times 880 \text{ MW} \times 60\%) = 1\,056 \text{ MW}$. Elle a été fermée en 2020, après 42 ans de service, alors qu'elle était encore en état de fonctionner de façon satisfaisante tant sur le plan technique que sur le plan sécuritaire, suite à une décision purement politique : il fallait faire un geste pour rallier les écologistes aux socialistes en vue de gagner quelques suffrages pour la présidentielle de 2012. Le sacrifice de **Fessenheim** a été la promesse électorale de **François Hollande** aux écologistes faite fin 2011.

Il s'avère que 1 056 MW de puissance effective est équivalent à $1\,056 \text{ MW} / (17\% \times 2,5 \text{ MW}) = 1\,565$ éoliennes terrestres occupant au bas mot $81 \text{ ha} \times 1\,565 = 126\,720 \text{ ha}$. Comme il y a beaucoup de surface, il y a beaucoup de distance de raccordement, donc de la perte électrique dans les câbles : 3%.

Finalement, la fermeture de **Fessenheim** ne peut être compensée que par $1\,565 \times (100\% + 3\%) = 1\,612$ éoliennes terrestres sur une surface de $126\,720 \text{ ha} \times (100\% + 3\%) = 130\,522 \text{ ha}$. Il y a à fin 2021 environ 7 173 éoliennes réparties en 2030 parcs sur la **France** métropolitaine. Donc la fermeture de **Fessenheim** est équivalente à $1\,612 / 7\,173 = 22,47\%$ du parc éolien terrestre actuel !

Comme les tranches de **Fessenheim** ont eu une production annuelle moyenne de 10,27 TWh et que le coût en **CO2** réel est de 506 g / kWh et non de 11 g / kWh, alors que le nucléaire de la génération **Fessenheim** est de 12 g / kWh, l'impact climatique réel est de $10,27 \text{ TWh} \times (506 \text{ g} / \text{kWh} - 12 \text{ g} / \text{kWh}) = 5,10419 \text{E}9 \text{ kg} = 5,1$ millions de tonnes de **CO2** émis en plus par an !

Les autres aberrations de notre politique énergétique

Quand du combustible nucléaire est produit à partir d'uranium, pour les centrales classiques en cours d'exploitation mais aussi pour les **EPR**, seul l'uranium en isotope **U235** nous intéresse. Or il est présent à l'état naturel qu'à l'état d'oxydes mêlant tous les isotopes : **U238** à 99,27%, **U235** à 0,72% et **U234** à 0,01%. Donc nous produisons aussi en quantité industrielle du combustible potentiel **U234** non utilisé. Exactement $99,27\% / 0,72\% = 138$ fois plus que nous stockons là où nous pouvons.

Ce combustible peut être utilisé dans un réacteur à neutrons rapides, comme l'ont été les prototypes **Phénix** et surtout **Superphénix**, qui offrent aussi l'avantage de pouvoir brûler les déchets les plus dangereux des centrales nucléaires classiques que nous enfouissons.

Superphénix a été très compliqué à mettre au point mais la dernière année de son exploitation en 1997, il a été fiable et rentable avec un facteur de charge de 30% et une

disponibilité de 95% en produisant 3,4 TWh. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Superphenix> Le sacrifice de **Superphenix** a été la promesse faite aux écologistes pour les maintenir dans la cohabitation de **Lionel Jospin**.

A ce jour nous avons en stock l'équivalent de 2000 à 3000 ans de production d'électricité selon les estimations. Comme le **PIB** de la **France** est de 2 775,25 B USD et celui de l'**Union européenne** à 27 de 15 923,06 B USD en 2018, soit un ratio de $2\,775,25 / 15\,923,06 = 17\%$, nous savons produire de l'électricité à quasiment 0 g / kWh de **CO2**, puisque le minerai est déjà extrait et traité, pour toute l'**Union européenne** pendant entre 2000 ans * 17% = 348 ans à 3000 ans * 17% = 523 ans !

En 2012, le nouveau modèle de réacteur à neutrons rapides proposé par le **CEA** émerge. En 2019, le budget nécessaire pour la réalisation du projet **Astrid** est de 738 millions €, ce qui a été jugé excessif par le gouvernement d'**Emmanuel Macron**. Il a préféré quelques mois plus tard appliquer la politique du "quoi qu'il en coûte", à ce jour 240 milliards €, soit 325 fois plus, tout en prônant la réindustrialisation et la transition énergétique.

Pendant ce temps-là, les **Russes**, moins imbéciles que nous, ont déjà leur réacteur en neutrons rapides en prototype depuis 1980. Un second a été mis en production cette fois-ci depuis 2016 de puissance 800 MW. D'autres projets de 1200 MW sont à l'étude. Les **Chinois** ont leur prototype de ce type de réacteur depuis 2010.

Nos hommes politiques sont avant tout des gestionnaires, cancren en technique, parce qu'ils sont majoritairement issus de **Sciences Politiques** ou de l'**ENA**, quand ils ne sont pas avocats, tout en étant conseillés par des personnes très orientées sur certains idéaux. Bref, ils se font mener par le bout du nez par qui a accès à eu, puisqu'ils sont incapables de produire une ligne de calculs. Le dernier technicien a été **Valéry Giscard d'Estaing**, polytechnicien.

Angela Merkel possède un diplôme d'une université polytechnique et un doctorat en physique en plus d'être douée pour les langues. **Boris Eltsine** a été ingénieur en travaux publics. **Xi Jinping** est ingénieur en génie chimique. Etc. Vous savez maintenant pourquoi la **France** est désormais classée entre le 21^{ème} et plutôt le 39^{ème} rang mondial en **PIB par habitant à parité du pouvoir d'achat**.
[https://fr.wikipedia.org/wiki/Liste_des_pays_par_PIB_\(PPA\)_par_habitant](https://fr.wikipedia.org/wiki/Liste_des_pays_par_PIB_(PPA)_par_habitant)

Conclusion

La production d'électricité, qui est critique pour notre économie, doit être évaluée en coûts complets, c'est-à-dire les coûts directs et les coûts indirects au prorata de l'usage, que soit pour calculer le bilan **CO2** ou le bilan économique.

Il s'avère que la solution par éolienne terrestre est un désastre en comparaison des autres solutions de production d'électricité :

- Sur le bilan **CO2** : moins bien que le gaz et à peine mieux que le charbon.
- Sur le bilan économique : bien plus cher que l'hydraulique ou le nucléaire, même avec un **EPR** hors de prix à 20 M€ le premier, 12 M€ le second et 8 M€ les suivants. Sur 10 **EPR**, en moyenne 9,6 M€ l'unité.

Et cela même sans prendre en compte les nuisances sur la biodiversité (déforestation, hausse de la température locale, sécheresse, effets lumineux, effets infra-sonores). Comment quelqu'un qui se dit écologiste peut prôner une telle solution énergétique ?

Il faut savoir que le coût de l'énergie dans la structure du coût d'une entreprise est de l'ordre de 10 % à 15 % selon le secteur d'activité. C'est 25 % du prix du pain ou de la pizza. Si le coût de notre électricité double, notre économie plonge.

En continuant la politique que nous menons, le plongeon est garanti.

Post-scriptum : une critique similaire pourrait être apportée pour la production d'électricité de masse à base d'éoliennes marines ou de panneaux photovoltaïques, même si le bilan serait meilleur du fait d'une plus grande densité énergétique : pas de déploiement de 2,5 MWc / 81 ha = 0,03 MWc / ha.

Annexes

Je vous invite à revoir en replay sur **M6** l'émission de **Bernard de la Villardière** intitulée "*La face noire des énergies vertes*" passée le dimanche 5 décembre 2021 à 21h05. https://tv-programme.com/dossier-tabou_magazine/la-face-noire-des-energies-vertes_e803512

Il y a également eu la "*La face cachée des énergies vertes*" sur **Arte** passée en 2020 encore disponible en streaming. Pour 2,99€, cela vaut le coup. <https://boutique.arte.tv/detail/la-face-cachee-des-energies-vertes>

Ou encore le documentaire "*Éoliennes : du rêve à la réalité*". <https://www.youtube.com/watch?v=Vf9EbpzDvoY&t=750s> Voici la liste des intervenants : <https://documentaire-et-verite.com/eoliennes/intervenants/>

Ce document est également disponible en téléchargement libre que vous pouvez partager avec vos connaissances : <https://www.up-comp.com/perso/climat/eoliennes.pdf>

Jean-Pierre DUVAL, MSC ENSIMAG + DEA INPG + MBA EM Lyon, le 9 décembre 2021.