

Peut-on se passer de nucléaire en France pour produire de l'électricité sans émettre de CO₂ ?

Par Berhang Shirizadeh, Quentin Perrier, Philippe Quirion (chercheurs ou anciens chercheurs au CIREN et auteurs de l'étude dont il est question dans cet article) et Alain Grandjean.

Janvier 2021

Suite à la publication de l'article [How sensitive are optimal fully renewable power systems to technology cost uncertainty?](#), dans lequel nous montrons qu'un mix électrique 100% renouvelable en France ne coûterait pas plus cher qu'aujourd'hui, Henri Prévot, ingénieur général des Mines, a fait circuler le 4 janvier une note d'une page¹ critiquant vigoureusement nos conclusions. Il y met en évidence sept conditions pour atteindre l'objectif envisagé dans notre étude et affirme qu'elles sont irréalistes.

L'année 2021 sera importante sur la faisabilité et les conditions d'un mix électriques avec moins ou sans nucléaire, du fait de la publication attendue d'une étude RTE/AIE, d'une étude RTE et d'une étude ADEME. Nous avons donc jugé opportun de répondre à la note d'Henri Prévot, car, est-ce utile de le dire, nous la pensons peu fondée. Alain Grandjean s'est joint à nous et a publié la présente réponse sur le [Blog des Chroniques de l'Anthropocène](#). Nous l'avons transmise à Henri Prévot en espérant qu'il la fasse parvenir à sa liste de diffusion.

Notre réponse est structurée de la façon suivante :

- nous reproduisons chacune des sept conditions (qui commencent chacune par "si") mises en évidence par Henri Prévot,
- et nous y répondons (texte en italique)

¹ Intitulée « L'électricité sans nucléaire ni CO₂, comme « Paris mis en bouteille » : avec six « si »... », cette note (qui comprend en fait sept conditions et non six comme indiqué dans le titre) est une synthèse d'un document plus détaillé disponible sur [le site d'Henri Prévot](#).

Premier « si » : diminuer la consommation d'électricité – aujourd'hui 500 TWh (térawattheures)

La consommation de fioul, de gaz et de carburant fossiles est aujourd'hui de 1100 TWh. L'objectif est de la ramener presque à zéro pour atteindre la « neutralité carbone ». Pour pouvoir diminuer *aussi* la consommation d'électricité, il faudrait des économies d'énergie qui coûteraient très, très cher. Il est admirable qu'une étude sur l'économie de l'électricité ne dise pas un mot des dépenses à faire pour économiser l'électricité – 20 à 30 milliards d'euros par an sans effet sur le CO₂.

Notre réponse.

Les différents mix de production et de stockage testés dans notre étude sont comparés pour une même demande d'électricité. Le coût des mesures d'économie d'électricité n'a donc aucune influence sur nos conclusions.

De plus, nous avons testé notre modèle avec la demande électrique observée en 2016 (480 TWh sur l'année, la plus élevée jamais observée). Il s'avère que non seulement le résultat est presque inchangé, mais qu'en fait le coût par MWh consommé est plus faible que dans notre article (dans lequel la demande est de 422 TWh sur l'année). Autrement dit, le profil de demande utilisé dans l'article est plus coûteux à satisfaire que [le profil historique](#). Un travail en cours avec "couplage sectoriel" (soumis, publié dans des proceedings des conférences IEEE², mais pas encore publié dans une revue scientifique), prend comme hypothèse la demande de la SNBC pour tout le secteur énergétique. Il s'avère que réduire les émissions de CO₂ au moindre coût implique de développer massivement l'usage de l'électricité, mais en produisant cette dernière principalement avec des énergies renouvelables. De plus, ne pas utiliser le nucléaire n'a presque pas d'impact sur le coût ni sur les émissions.

Le document de prépublication en libre accès (sans paywall) :

<https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3681485>

Deuxième « si » : la stabilité du réseau électrique en l'absence des masses tournantes de production

Qu'on imagine le système électronique de « contrôle et commande » d'un ensemble de centaines de milliers ou millions de points de production d'électricité répartis sur

² <https://ieeexplore.ieee.org/document/9221956>

tout le territoire pour équilibrer à chaque instant production et consommation sans l'aide apportée par l'inertie de la masse des turbines et alternateurs. Les auteurs de l'étude, pour affirmer qu'il n'y aura pas de problème, se réfèrent à quelques réalisations qui sont très loin d'avoir l'ampleur de ce qui serait nécessaire à l'échelle française, balayant ainsi toute objection : une forme de détachement du réel assez sympathique car elle permet de rêver.

Notre réponse

Si l'argument est la gestion de fréquence du réseau, les solutions, notamment des volants d'inertie et des condensateurs, sont déjà en fonction. Donc la gestion de fréquence et l'inertie du système électrique ne favorisent pas l'énergie nucléaire face aux énergies renouvelables.

En revanche, concernant les réserves pour la stabilité de l'ordre de la seconde et de la minute, la participation du nucléaire aux réserves n'étant pas un choix optimal, la situation est en train de changer. Les arguments de capacité ont une importance mineure sur le plan économique³. Prenons un exemple : considérons les volants d'inertie comme la seule option qui participe aux réserves primaires et secondaires (donc l'inertie est assurée). Selon l'équation utilisée dans le modèle EOLES_elecRES (inspirée des recommandations des gestionnaires de réseau électriques européens), le besoin de réserves croît avec la part des renouvelables. Pour un système 100% renouvelable, ce besoin est de 5 à 6 GW. Si toute cette capacité est fournie par les volants d'inertie à (700€/kW et 15 ans de durée de vie – actuellement utilisé dans le réseau de New York) le surcoût de l'électricité est de :

$$700\text{€/kW} \cdot 5\text{GW} / (420\text{TWh} \cdot 10^6 \cdot 15 \text{ ans}) = 0.55\text{€/MWh}$$

Même si on prend 10GW, le surcoût sur l'électricité devient seulement 1€/MWh. Donc il ne faut vraiment pas exagérer l'importance économique de la stabilité du réseau. Bien entendu, dans le cas d'un système fortement renouvelable, les stratégies de contrôle de fréquences doivent être améliorées, mais ces stratégies sont déjà présentes⁴.

³ Voir [Mix de production d'électricité – énergie et puissance](#) sur le site Alternatives Energétiques (Mai 2020)

⁴ On trouve de nombreuses études sur ce point dans les publications de IEEE. Il suffit également de chercher "stability of power systems with large shares of renewables" ou "stability of fully renewable power systems" sur google.scholar. Voir par exemple : Kaushik Das, Feng Guo, Edgar Nuño, and Nicolaos A. Cutululis [Frequency Stability of Power System with Large Share of Wind Power Under Storm Conditions](#), *Journal of modern power systems and clean Energy* (March 2020) et [Frequency Stability and Control in Smart Grids](#), Hassan Bevrani, Qobad Shafiee, and Hemin Golpira, sur le site Smart Grid de l'IEEE.

RTE a sorti dernièrement une analyse par [vidéo](#) qui fait le point sur le sujet, et montre qu'il n'y a pas de vraie difficulté sur ce plan « pour un système électrique largement, voir complètement renouvelable », grâce aux solutions très simples, économiques et peu connues publiquement : les compensateurs synchrones et l'inertie synthétique.

Troisième « si » : sont acceptés 30 000 éoliennes et 3000 kilomètres carré de photovoltaïque.

Notre réponse

Sur un plan plus général, plusieurs études de potentiel ont été réalisées (dont quelques-unes en annexe 8 de notre article [100% électricité renouvelable](#)) et montrent qu'on est très loin des limites foncières. D'ailleurs, la capacité en éolien et solaire dans notre scénario central pour 2050 est proche des objectifs de l'Allemagne pour 2030, alors que cette dernière a une superficie nettement moindre et une densité nettement plus élevée.

Concernant les éoliennes terrestres, installées sur des terrains multi-usages, dont un usage est d'accueillir des éoliennes... elles n'ont presque pas d'impacts sur la biodiversité pourvu que les parcs soient bien conçus et gérés⁵.

Concernant le photovoltaïque, 1/3 de nos installations sont au sol, considérant une efficacité de 20%, un ratio surface module⁶ de 50% et l'ensoleillement de 1000W/m², nous arrivons à une énergie récupérable (hypothèse pessimiste) de 100W/m². 1/3 de 90 à 120 GW est 30 à 40 GW, donc 300 à 400 km², entre 0.05% et 0.07% de surface de la France.

⁵ Voir l'article [Oiseaux, chauves-souris et éoliennes : quelle cohabitation ?](#) sur le site Décrypter l'énergie

⁶ C'est le taux d'occupation d'un parc solaire au sol par les modules solaires : la surface des panneaux divisée par celle du parc.

Quatrième « si » : être indifférent à notre autonomie sur les matériaux et sur la technique

Pour une même production utile, l'éolien consomme dix fois plus de fer et de cuivre que le nucléaire et aussi d'autres matières critiques importées obtenues par des procédés très polluants. De plus, la France maîtrise la technique nucléaire et dépend de la Chine pour le photovoltaïque.

Réponse

Les matériaux utilisés pour faire les éoliennes, les panneaux solaires et les batteries aussi peuvent être recyclés : les éoliennes à 90%⁷, les panneaux solaires à 94.7%⁸ et les batteries à 95%⁹. Il suffit de voir juste les offres commerciales.

L'étude ne traite pas de cette question – elle ne peut tout aborder. Relevons cependant que du côté du nucléaire, l'uranium est importé. Quant aux déchets nucléaires, ils nécessitent des investissements considérables. Enfin, puisque l'objectif est de sortir des énergies fossiles, la situation ne serait pas pire que l'actuelle, qui consiste à importer pétrole et gaz.

Cinquième « si » : ne pas se préoccuper d'une faiblesse du vent et du soleil quelques jours durant

En hiver, la production journalière par le soleil peut être vingt fois moindre qu'en été (comme en janvier 2013). Et le vent peut ne produire que quelques pourcents de sa capacité nominale. Ces défauts de production sont beaucoup plus sérieux que les « pointes » de consommation car ils peuvent durer plusieurs jours de suite. Pour les compenser, toutes les batteries de véhicules électriques ne suffiraient pas. Il faudra produire de l'électricité avec un gaz de synthèse qui aura été produit en consommant quatre fois plus d'électricité ; donc encore plus d'éoliennes et de photovoltaïque – cf. les 3^{ème} et 4^{ème} « si »... à moins d'accepter une grave dégradation du service public de l'électricité.

Réponse

⁷ <https://fee.asso.fr/comprendre/desintox/eolien-demontage-recyclage-et-terres-rares/>

⁸ <https://www.insunwetrust.solar/blog/?p=2963>

⁹ <https://www.lithionrecycling.com/fr/>

Le risque d'une période sans vent ni soleil est bien évidemment compris par les auteurs, ainsi par les relecteurs de la revue scientifique qui ont validé sa publication.

La simulation a été faite sur 18 années météo dont certaines avec des périodes sans vent ni soleil. Pendant ces périodes il est fait recours à du biogaz et du méthane de synthèse (P2G). Plus précisément, dans le système électrique 100% renouvelable de notre scénario central, il y a 33 GW de capacité thermique alimenté par du biogaz ou du méthane de synthèse (à partir du CO₂ biogénique), 13 GW d'hydro-électricité pilotable (les lacs), 9.3 GW de STEPs, et 21GW de batteries, au total plus de 76GW de capacité disponible hors énergies renouvelables variables.

Sixième « si » : ne pas s'inquiéter de l'insécurité d'une gestion tribulaire du numérique

Tout système de communication numérique, électronique ou informatique est vulnérable à des agressions y compris venant de pouvoirs étatiques, comme le montrent l'efficacité prêtée à Israël ou à la Russie pour piller les données personnelles ou stratégiques ou saboter des systèmes de production.

Réponse

Cet aspect n'est pas traité dans l'étude, car il sort du champ purement économique. Aucune étude ne semble cependant avoir indiqué que les renouvelables étaient plus sujet à des risques de cyber-sécurité que l'industrie nucléaire. Le nucléaire pose d'ailleurs des questions de sûreté considérables, au-delà même de la question électrique. [L'exemple du ver informatique Stuxnet](#) qui a touché le programme nucléaire iranien en 2010 est révélateur à cet égard. La sécurité numérique est une préoccupation déjà très présente, du fait de la complexité du système (avec la gestion du marché et l'allocation des merit-orders entre les moyens de production).

Septième « si » : l'éolien flottant, aujourd'hui 350 €/MWh, sera à 40 €/MWh, le solaire à 27 €/MWh

Il faudra d'énormes capacités de production (en gigawatts) et il faudra aussi dépenser davantage pour transporter et distribuer cette électricité produite un peu partout et fluctuante. Qu'à cela ne tienne ! Il suffit de faire des hypothèses de coût de production éolien et photovoltaïque assez basses pour que « sans nucléaire » coûte moins qu'avec du nucléaire. CQFD - précisément.

Réponse

Les estimations de coûts sont basées sur des rapports d'organismes indépendants et reconnus (notamment le centre de recherche de l'Union européenne, le [JRC](#)). D'ailleurs, notre modélisation ne comporte pas d'éolienne flottante, mais des éoliennes posées en mer. En outre, le modèle ne met pas en entrée des LCOE mais des CAPEX et OPEX ; avec l'introduction des profils météo, c'est le modèle qui calcule le LCOE. Ce LCOE est de 45€/MWh pour les éoliennes en mer et de 40€/MWh pour les éoliennes terrestres. Enfin, on peut noter que les [résultats d'appels d'offre récents](#), dont celui du parc de Dunkerque, sont déjà très proches des LCOEs qui sortent de nos modèles.