



Henri Prévot
henri.prevot@wanadoo.fr
www.hprevot.fr

le 4 mai 2020

Une étude prospective sur « 50% nucléaire » sans émission de CO₂ en 2050
Capacités éolienne et photovoltaïque, stockage, production d'hydrogène, dépenses,
comparaison avec plus de nucléaire et peu d'éolien et de photovoltaïque

Cette étude est une contribution aux réflexions prospectives sur l'électricité et sur sa place dans le paysage énergétique français. Par exemple, la capacité de production d'électricité peut être délibérément excédentaire pour produire de l'hydrogène qui sera consommé hors du secteur de l'électricité ; réciproquement une consommation d'électricité peut être remplacée en période de tension par une autre forme d'énergie qui se stocke aisément.

Nous avons utilisé un modèle de simulation simplifié, publié sur www.hprevot.fr. On peut en voir une présentation simplifiée en annexe.

Remarque préliminaire

La loi sur la transition énergétique fixe comme objectif que le nucléaire ne dépasse pas 50 % de la consommation à partir de 2035 et RTE n'étudie pas d'hypothèses où le nucléaire dépasserait 50 % de la consommation. On a du mal à considérer que les motifs parfois avancés sont fondés. Notamment « équilibrer » le parc de production n'a aucun sens puisqu'une ressource pilotable serait remplacée par d'autres qui ne le sont pas et qui peuvent ne rien fournir lorsqu'on en a le plus besoin.

Il se pourrait qu'il y ait une autre raison d'étudier le cas « 50 % nucléaire » en 2050. En effet, il n'est pas certain que l'industrie serait en mesure de construire suffisamment de réacteurs nucléaires pour dépasser cette proportion en 2050. Mais cela ne doit pas nous dissuader de comparer un parc « 50% nucléaire » avec un autre qui serait conçu de façon à répondre à la demande au moindre coût même si un tel parc de production ne peut se réaliser qu'au-delà de 2050.

La loi sur la transition énergétique donne comme objectif, en 2050, la « neutralité carbone ». Celle-ci implique que l'électricité remplace une bonne partie du fioul, du gaz et du carburant que nous consommons aujourd'hui, qu'elle serve aussi à produire des combustibles et carburants de synthèse et qu'elle-même soit produite sans émissions de CO₂. Par ailleurs, la loi dit que la proportion d'électricité d'origine nucléaire dans la consommation d'électricité ne doit pas dépasser 50 % en 2035 mais n'en dit rien à l'échéance de 2050 et au-delà. Le débat est donc ouvert.

La consommation annuelle d'énergie fossile est aujourd'hui voisine de 1000 TWh (térawattheures ou millions de MWh). La SNBC, stratégie nationale bas carbone, prévoit que la consommation annuelle d'électricité, augmentera de 40 TWh seulement. C'est très peu. Nous supposons ici qu'elle augmentera de 150 TWh, ce qui la porterait à 650 TWh (avant les pertes en ligne), et nous étudions comment y répondre avec 50 % d'électricité d'origine nucléaire en dépensant aussi peu que possible. Puis nous comparons les dépenses à celles d'un autre parc de production comportant peu d'éoliennes et de photovoltaïque et ce qu'il faut de nucléaire pour éviter les émissions de CO₂. Et nous donnons un coup de projecteur sur une configuration où la capacité nucléaire serait très faible.

Cette étude a bénéficié des avis et informations donnés par plusieurs membres de l'association « *Sauvons le climat* », en particulier Georges Sapy ; je les en remercie.

Les principaux résultats de cette étude

- Parmi les parcs de production et de stockage répondant à une demande annuelle de 650 TWh sans émission de CO₂ et avec 50 % d'électricité d'origine nucléaire en dépensant le moins possible, celui qui est étudié ici est formé de 34 réacteurs nucléaires EPR, soit 54 GW, 180 GW d'éoliennes et photovoltaïque avec, pour produire du gaz de synthèse, une capacité d'électrolyse pouvant consommer 20 GW d'électricité.
- L'inertie des turbo-alternateurs des groupes nucléaires suffirait à préserver la stabilité du réseau sans refuser l'accès aux productions éolienne et photovoltaïque. Néanmoins, pour éviter les très fortes variations de puissance nuisant à l'exploitation du parc nucléaire, nous avons supposé que la puissance délivrée ne serait jamais inférieure à 50 % de la puissance nominale, ce qui conduit à *refuser l'accès au réseau de 35 TWh par an d'une production éolienne et photovoltaïque.*
- Des batteries ou autres moyens de stockage seront très utiles s'ils peuvent *garantir* un apport de puissance *jusqu'à 5 GW*, ce qui permettra de bien utiliser les capacités de stockage existantes (STEPS et modulation quotidienne de la production des lacs et des fleuves). Il suffit pour cela d'ajouter 8 GWh aux moyens existants. Au-delà, les batteries et autres moyens de stockage sont inutiles car trop coûteux.
- La capacité de production à partir de gaz est de 51 GW. Elle peut être moindre si l'on se fie à l'importation. Celle-ci est limitée par la capacité des lignes d'interconnexion et, naturellement, par les besoins des pays voisins.
- Les consommateurs d'électricité pourront accepter que leur fournisseur annule définitivement une partie de ses livraisons à son initiative, sans préavis, pour quelques minutes ou quelques jours, s'ils peuvent *remplacer* l'électricité par une autre forme d'énergie qui se stocke aisément. Tel sera le cas avec les véhicules hybrides rechargeables ou avec un chauffage hybride qui combine électricité et gaz ou fioul. Si la puissance ainsi effacée peut aller jusqu'à 20 GW, la consommation effectivement effacée pourrait-être de 10 TWh par an. Ce dispositif éviterait la production d'une électricité « de pointe » très coûteuse (on calcule ici 450 €/MWh) et le renforcement des réseaux de distribution.
- Pour répartir cet avantage entre le fournisseur et son client, il serait judicieux de proposer un tarif d'électricité très favorable pour cette électricité effaçable sans préavis.
- Les possibilités de production excédentaires sont de 79 TWh par an. Elles apparaissent épisodiquement et aléatoirement et les pointes sont souvent étroites. C'est pourquoi, même si la capacité des lignes électriques de liaison avec les pays voisins double (à 25 GW), les exportations ne peuvent pas dépasser 55 TWh, dont 33 provenant d'éoliennes ou de photovoltaïque et 23 de nucléaire. Pour consommer ce qui ne serait pas exporté, une capacité de 20 GW fonctionnerait seulement à 10 % de ses possibilités. Le meilleur usage serait sans doute de chauffer l'eau de réseaux de chauffage urbain par effet Joule.
- Sans exportations, les possibilités de production excédentaires permettraient de produire environ 30 TWh de méthane de synthèse à un coût de 180 €/MWh si l'électricité est valorisée à 20 €/MWh.
- Une plus grande capacité de production permettrait de produire plus d'hydrogène mais augmenterait le coût moyen de production. Le prix payé par l'électrolyse devrait alors être ajusté pour ne pas augmenter les dépenses à la charge de la consommation finale d'électricité. Avec une augmentation de la capacité éolienne ou photovoltaïque, le coût de l'hydrogène est de 2,9 € par kilo. Avec une augmentation de la capacité nucléaire, il est de 1,8 € par kilo et le coût du méthane de 120 € par MWh.
- Pour produire l'électricité sans émissions de CO₂, avec peu d'éoliennes et de photovoltaïque (40 GW en tout) et avec 84 GW de nucléaire, les dépenses seraient **inférieures de 11 milliards d'euros par an** à celles d'un parc de production limitant le nucléaire à 50 %.
- En augmentant la capacité nucléaire, il serait possible de produire de l'hydrogène à 1,7 € par kilo et du méthane à 100 € par MWh.

- Si la capacité nucléaire est seulement de 15 GW (une hypothèse retenue par RTE dans un de ses scénarios pour 2050, le scénario N1), il sera possible de répondre à la demande sans émission de CO₂, sous réserve que la stabilité du réseau puisse être préservée, avec 400 GW d'éoliennes et de photovoltaïque ; les dépenses seraient supérieures de 16 milliards d'euros par an à celles d'un scénario « 50 % de nucléaire ».

- L'évaluation des différents scénarios ne manquera pas de prendre aussi en considération les effets sur l'environnement, l'occupation de l'espace, la consommation de matériaux et de métaux stratégiques.

Le plan de cette note

- 1- La consommation d'électricité ; les déplacements de consommation et l'effacement définitif
 - Une variante avec chauffage hybride
- 2- Le parc de production et de stockage d'électricité
 - 2.1 Le stockage et déstockage : la production de gaz de synthèse pour produire de l'électricité
 - 2.2 Les moyens de production
 - 2.3- Stabilité du réseau, équilibre entre fourniture et consommation d'électricité
 - 2.3.1 - La stabilité du réseau électrique ; l'apport d'une inertie mécanique
 - 2.3.2 – Batteries et déplacements de consommation
 - 2.3.3- La capacité de production à partir de gaz, d'origine fossile ou de synthèse
 - 2.3.4 – consommation, production, possibilités de production excédentaires, exportations
 - Avec d'autres chroniques horaires de consommation et d'activité éolienne
 - 2.3.5- Lorsqu'il existe des possibilités d'effacement définitif
 - 2.3.6- Les possibilités de production excédentaires
 - La nature des possibilités excédentaires : « fatales » ou « voulues »
 - Les possibilités de production excédentaires fatales
- 3- Les dépenses et la valorisation des possibilités de production excédentaires
 - 3.1- Les coûts et les dépenses de production et de stockage
 - 3.1.1- Les coûts
 - 3.1.2- Les dépenses
 - 3.2- La valorisation des possibilités de production excédentaires
 - 3.3- En cas d'effacement définitif,
 - Les dépenses de production d'électricité / Les dépenses faites par le consommateur / Le bilan
 - 3.4- Un bilan économique du parc de production électrique avec 50 % de nucléaire.
 - 3.5 - Une variante supposant que la consommation est de 700 TWh au lieu de 650 TWh
 - 3.6- Produire de l'hydrogène et du méthane pour une utilisation hors électricité
 - 3.6.1- Les composantes du coût de production d'hydrogène et de méthane
 - 3.6.2- Lorsque le parc de production d'électricité est adapté à la demande
 - 3.6.3- Lorsque la capacité du parc de production dépasse les besoins de la consommation
 - 3.6.4- De la difficulté de dire quel est le coût de production de l'hydrogène ou du méthane
- 4- Un autre jeu d'hypothèses avec peu ou pas d'éolien et de photovoltaïque
 - 4.1- Sans éolienne ni photovoltaïque
 - 4.2- Avec 20 GW d'éoliennes et 20 GW et photovoltaïque
 - 4.2.1- Un parc de production répondant à la demande au moindre coût
 - 4.2.2- Produire du méthane utilisable hors du système électrique
 - Sans augmenter la capacité nucléaire / en augmentant la capacité nucléaire
- 5- Une variante avec peu de nucléaire (15 GW)
- 6- Conclusion :
 - Plus ou moins de nucléaire et coût de production d'électricité

Peu de nucléaire, c'est 16 milliards par an de plus que 50 % nucléaire sans effet sur le CO₂
50 % nucléaire, c'est 11 milliards d'euros par an de dépenses sans effet sur les émissions de CO₂
50 % nucléaire ou moins : de graves atteintes à l'environnement et à la sécurité d'approvisionnement
Autres résultats de cette étude

ANNEXE 1 : Présentation du modèle de simulation du système électrique SimelSP

ANNEXE 2 : le chauffage hybride en utilisant la chaudière existante

ANNEXE 3 : Tableaux présentant les principaux résultats

ANNEXE 4 : Coût de production d'hydrogène et de méthane selon plusieurs jeux d'hypothèses

Lien vers la note d'étude complète (fichier pdf) :

https://www.sauvonsleclimat.org/images/articles/pdf_files/etudes/Notes_Henri_Prevot/note_etude_650TWh-50pcnucl-V9.pdf