

L'énergie nucléaire et les énergies renouvelables sont-elles complémentaires ?

Patrick MICHAILLE

1. INTRODUCTION

Des publications de début 2017 (SFEN, EDF, CEA) annoncent que le nucléaire et les renouvelables sont complémentaires. Or en France, le nucléaire sert essentiellement à faire de l'électricité, et les renouvelables ne consistent pour le grand public qu'en éolien et solaire photovoltaïque (PV), produisant de l'électricité à partir de sources intermittentes, ce qui déstabilise les réseaux électriques. Comment parler alors de complémentarité, voire de synergie ?

2. DÉFINITION DES TERMES

2.1. COMPLÉMENTARITÉ

Le complément est l'élément nécessaire devant être intégré à un ensemble pour former un tout complet, de manière que rien d'essentiel ou d'utile ne lui manque. La complémentarité se réfère à un état statique.

2.2. SYNERGIE

Elle désigne l'action coordonnée de plusieurs systèmes, d'où résulte l'accomplissement d'une fonction. La synergie introduit une notion dynamique.

2.3. ÉNERGIES RENOUVELABLES

Ce sont des énergies qui ne font pas appel au contenu de la croûte terrestre accessible à l'homme, les combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz) ou les minerais (uranium, thorium). Les énergies renouvelables (EnR) résultent de l'action :

- du Soleil (rayonnement pour le photovoltaïque (PV) et la photosynthèse ; effet thermique qui provoque le vent, les courants, les chutes de pluie)
- de la Lune (marées et courants de marée)
- de la Terre : chaleur dégagée par la radioactivité du noyau terrestre (uranium, thorium, principalement)

On distingue :

- les énergies renouvelables carbonées (biomasse, qui est reconstituée par la croissance des plantes en présence de soleil et d'eau),
- les énergies renouvelables non carbonées [EnR] :
 - hydraulique de chute et au fil de l'eau ; marées, vent, solaire thermique et PV, pour les plus exploitées ;
 - courants, vagues, à l'état de développement.

La biomasse et l'eau sont stockables directement ; par contre, le vent et l'ensoleillement sont des phénomènes intermittents. Jusqu'à présent, on s'en servait pour produire des biens stockables, par exemple :

- l'eau remontée par les éoliennes, la distance parcourue à la voile, la farine moulue par les moulins à vent ;
- la chaleur diffusée par les murs exposés au soleil, le séchage des aliments pour pouvoir les conserver.

2.4. TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

L'énergie utilisée dans le monde est pratiquement totalement carbonée : les énergies fossiles (pétrole, charbon, gaz) représentent les 4/5^{èmes} (78,4 %) des consommations d'énergie, auxquelles il faut rajouter la biomasse qui en représente 9,1 %.

Ce n'est pratiquement que pour la production d'électricité que des énergies décarbonées sont utilisées : l'hydraulique (3,6 %) et le nucléaire (2,3 %).

Or il est désormais admis que les rejets de gaz à effet de serre (GES ; principalement le CO₂) provoquent un réchauffement du globe et une modification du climat, qui entrainera une dégradation des conditions de vie pour l'espèce humaine. L'ONU tente de mettre en place une politique visant à faire décroître les rejets de GES, et le plus tôt sera le moins coûteux, d'où le recours urgent aux énergies non carbonées.

3. LES PRINCIPALES CONSOMMATIONS D'ÉNERGIE ET LEUR DÉCARBONATION HORS ÉLECTICITÉ

3.1. L'INDUSTRIE

Au XIX^{ème} siècle, la révolution industrielle s'est fondée sur la machine à vapeur fonctionnant au charbon, et sur la production d'acier. Au XX^{ème} siècle, des efforts importants d'économie d'énergie ont déjà été réalisés lors de la « chasse au gaspi » des années 1970 – 80. Au XXI^{ème} siècle, dans le secteur de l'industrie, la désindustrialisation du pays fait qu'on n'attend pas de hausse de consommation d'énergie, ni – à court terme – de progrès significatif en matière de décarbonation.

3.2. L'AGRICULTURE

Elle est à même de produire son énergie en cohérence avec ses besoins (biomasse pour la chaleur, agro-carburant pour les transports, éoliennes pour les besoins mécaniques (irrigation) et solaire-PV pour le contrôle-commande des procédés. Les groupements agricoles d'exploitation en commun (GAEC) peuvent investir de façon rentable dans des installations de méthanisation qui consomment leurs déchets agricoles et animaux (lisier) et produisent du méthane et des engrais. L'agriculture constitue le modèle d'une transition écologique : consommation maîtrisée ; recyclage des déchets en matières valorisables et en énergie ; autoproduction d'énergie naturelle décarbonée requérant des terrains (éolien, solaire) et pouvant être stockée (bassins hydrauliques, chaleur).

3.3. LES TRANSPORTS

L'électrification des transports collectifs (train, métro, tramway, trolleybus) remonte au début du XX^{ème} siècle. Mais depuis, le développement des moyens individuels et de l'aviation s'est fait grâce au pétrole, et les carburants fossiles (essence, gaz, gazole, kérosène) fournissent très majoritairement l'énergie nécessaire.

La décarbonation des transports pourra se produire en utilisant 2 vecteurs énergétiques : l'électricité et l'hydrogène. Pour les transports collectifs, l'hydrogène, utilisé au moyen de piles à combustible, pourra remplacer à l'avenir les moteurs diesel, par exemple dans les trains, sur les lignes non électrifiées. Pour les transports plus mobiles (bus, camion, voiture), les batteries électriques conviennent pour des parcours réguliers : leurs performances sont en constante augmentation.

Il ne faut pas oublier que si ces vecteurs propres (électricité et hydrogène) ont l'immense avantage de ne pas polluer en ville, la fabrication des batteries et piles à combustible est extrêmement polluante et consommatrice de ressources naturelles limitées. En outre, la production d'électricité à stocker dans les batteries doit elle-même être décarbonée, sinon le bilan carbone est nul¹.

3.4. LE CHAUFFAGE RÉSIDENTIEL

Le chauffage résidentiel s'est fortement développé après la guerre : des économies sont donc possibles, en baissant un peu la température des logements et en enfilant un vêtement qui garde la chaleur du corps. Dans les logements, de gros efforts d'isolation et de chauffage économe en énergie ont déjà été réalisés et doivent être poursuivis, mais il faut surmonter des freins sociétaux :

- La capacité de garantir un résultat : l'artisan est capable de dire ce que va coûter le supplément d'isolation, mais pas de garantir l'économie d'énergie qui en résultera (d'autant qu'elle dépend des habitudes comportementales)
- La formation du personnel des entreprises : l'artisanat est émietté (un million d'entreprises en France), et les patrons n'ont guère le temps ni les moyens financiers pour former leur personnel

La labellisation des entreprises artisanales prendra du temps. En France, les sources de chauffage sont essentiellement : l'électricité, la biomasse, le pétrole et le gaz. La RT 2012 favorise le gaz, et il est effectivement rentable, en termes d'énergie économisée, de remplacer, à l'occasion d'un changement de chaudière, une

¹ <http://www.ademe.fr/elaboration-selon-principes-acv-bilans-energetiques-emissions-gaz-a-effet-serre-autres-impacts-environnementaux>

chaudière à pétrole par une chaudière à condensation. Pour autant, on reste avec une énergie carbonée, alors qu'en France l'électricité est décarbonée et que la biomasse peut être considérée comme neutre vis-à-vis du carbone. La RT 2012 n'est donc pas une réglementation visant à la décarbonation.

Le solaire thermique est peu répandu en France, pour des raisons qu'on peut imaginer : l'ensoleillement est plus rare et moins énergétique l'hiver, quand on a besoin de chaleur ; il faut un double circuit pour faire face au risque de gel, ce qui grève le coût du système. En fait, le solaire peut être utilisé avec un circuit de géothermie de surface couplé à une pompe à chaleur eau-eau ou eau-air. Sinon, les bâtiments à basse consommation captent la chaleur sur les parois ensoleillées, mais ils ne sont construits qu'au taux de renouvellement du parc (# 1 %, soit 300.000 logements par an).

À noter que dans les pays de l'ex-URSS et d'Europe de l'Est, le nucléaire est utilisé couramment comme moyen de chauffage des réseaux urbains ; en France, il est utilisé pour les serres au voisinage des centrales².

La climatisation se développe avec la recherche de confort liée à l'augmentation du niveau de vie. Les pompes à chaleur (pàc) air-air se répandent, en produisant selon la saison du froid ou de la chaleur. La meilleure efficacité est obtenue avec la géothermie de surface et la thalassothermie, qui fournissent pour l'hiver une source tiède, et l'été une source fraîche, avec une pompe à chaleur eau-eau dont le rendement est supérieur à celui d'une pàc air-air.

3.5. SYNTHÈSE DES CONSOMMATIONS D'ÉNERGIE

Il est donc théoriquement aisé de décarboner notre société : il suffit de tout passer à l'électricité, en complétant avec la biomasse et la géothermie pour le chauffage, quand c'est rentable. Seule l'agriculture, activité qui utilise par définition de grands territoires, peut panacher l'ensemble des énergies naturelles incluant l'éolien et le solaire photovoltaïque.

4. L'ÉLECTRICITÉ

4.1. RAPPEL HISTORIQUE

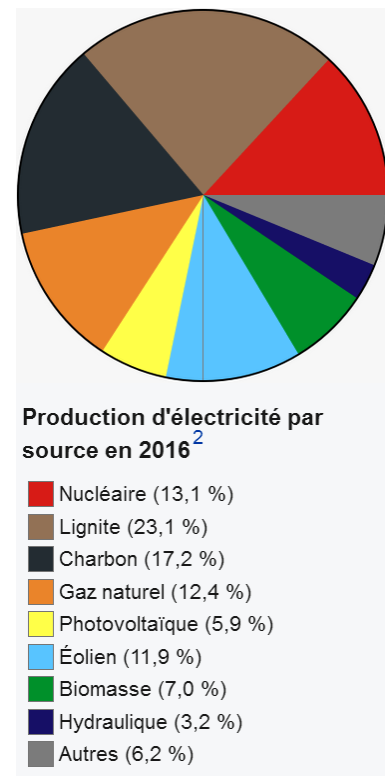
Au XIX^{ème} siècle, la révolution industrielle s'est fondée sur la machine à vapeur fonctionnant au charbon, et sur la production d'acier. Au XX^{ème} siècle, des efforts importants d'économie d'énergie ont déjà été réalisés lors de la « chasse au gaspi » des années 1970 – 80. Au XXI^{ème} siècle, dans le secteur de l'industrie, la désindustrialisation du pays fait qu'on n'attend pas de hausse de consommation d'énergie, ni – à court terme – de progrès significatif en matière de décarbonation.

4.2. LES EnRi³ ET L'ÉLECTRICITÉ

Pour décarboner leur électricité, les Allemands ont introduit des éoliennes, afin de réduire la pollution par le charbon quand les éoliennes fonctionnent. Dans le sud de l'Allemagne, ils ont également fortement investi en photovoltaïque, là où le soleil est plus abondant et le vent moins fréquent.

En 2015, la puissance installée en Allemagne est : 44,7 GW éolien (production 12 %) et 39,8 GW solaire (production 6 %) ; le nucléaire, avec 11 GW, produit 14 %, soit un facteur de charge 6 fois plus important par GW installé⁴ (voir Figure 1).

Figure 1 : Production d'électricité en Allemagne en 2016 ➔



Il faut prendre en compte la perturbation qu'introduit l'intermittence sur la gestion d'un réseau électrique. L'étude d'EDF-R&D montre que sur le réseau européen, la part acceptable d'EnRi, pour une moyenne visée de 40 % d'énergie produite, peut varier entre 75 % quand la demande est forte à aussi peu que 25 % quand la demande est faible, en raison des instabilités créées sur le réseau. Il y a donc des limites à l'introduction des EnRi, le reste

² 3 des 4 réacteurs de Tricastin servaient à l'alimentation thermique de l'usine GB1 ; les eaux chaudes de la centrale de Gravelines permettent de réchauffer le GNL du terminal méthanier de Dunkerque.

³ EnRi : énergies renouvelables intermittentes, pratiquement éolien et solaire.

⁴ Wikipedia https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89lectricit%C3%A9_en_Alemagne

devant être complété par des sources pilotables, de préférence décarbonées : soit renouvelable (hydraulique), sinon recyclable (nucléaire), ou neutre en carbone (biomasse)⁵. Il faut en effet rappeler le risque que constitue un effondrement généralisé du réseau (*black out*) : le coût pour la France serait de 7,6 Md€⁶ (à comparer au coût de construction d'un EPR optimisé).

C'est pourquoi les Allemands ont maintenu leur parc de centrales à charbon ; l'ensemble des sources carbonées produit encore 66 % de l'électricité allemande, les EnRi ne représentant que 18 %, malgré les milliards d'euros engloutis dans l'*Energiewende*.

4.3. EN FRANCE, LES ÉNERGIES RENOUVELABLES NE SONT PAS INDISPENSABLES POUR PRODUIRE DE L'ÉLECTRICITÉ DÉCARBONÉE

Si l'objectif est de décarboner l'électricité, en France c'est déjà fait, ce qui nous place très en avance sur les autres pays de l'Union européenne, à l'exception de la Suède (Figure 2). Nous n'avons pas besoin des EnRi pour décarboner l'électricité tant que nous maintenons notre parc nucléaire à son niveau de puissance actuel, limité par la loi à 63,2 GW.

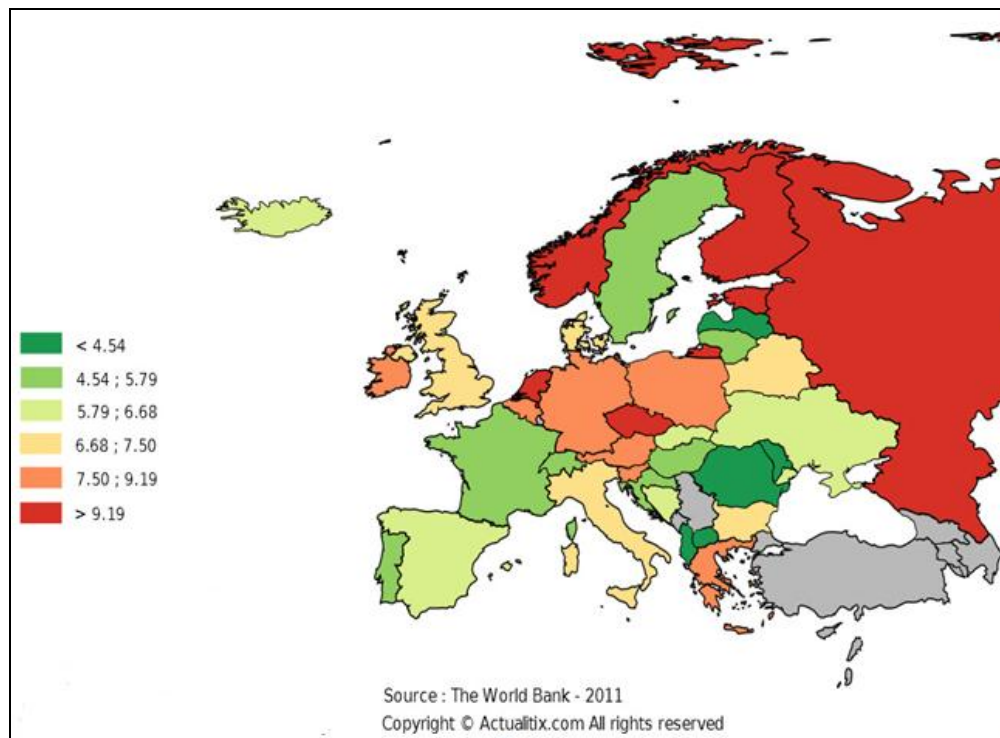


Figure 2 : Emissions de GES en Europe (en t par an et par habitant)

5. DANS QUELLES CONDITIONS RENOUVELABLES ET NUCLÉAIRE SONT-ILS COMPLÉMENTAIRES ?

5.1. POUR PRODUIRE DE L'ÉLECTRICITÉ

Compte tenu que les EnRi ne peuvent alimenter à elles seules un réseau, il y a deux possibilités :

- Limiter les EnRi à l'autoconsommation : c'est possible pour l'agriculture, qui est une activité diurne (voir § 3.2). C'est aussi la solution pour les sites isolés (îlots, refuges de montagne, etc.) en complétant avec des batteries, ce qui limite pratiquement la consommation à l'éclairage et à l'alimentation de l'électronique.
- Compléter avec des énergies renouvelables pilotables (stockables) : hydraulique, biomasse. Ces ressources dépendent des conditions locales : la Norvège, très équipée en hydraulique, peut facilement subvenir aux défaillances des éoliennes danoises, mais tous les pays ne sont pas montagneux et bien arrosés. La biomasse, pour être durable, est limitée par son renouvellement ; en Allemagne, où elle est fortement développée, elle ne représente que 7 % de la production d'électricité.

5.2. POUR PRODUIRE DE L'HYDROGÈNE POUR LES TRANSPORTS

⁵ G. Sapy, P. Michaille « Jusqu'où peut-on insérer des énergies intermittentes dans le réseau électrique ? »

⁶ Energie Institut, Johannes Kepler Universität, Linz, Autriche.

En France, l'objectif politique de réduire la part du nucléaire à 50 % de la consommation ne peut pas être atteint en augmentant les EnRi sans émettre davantage de CO₂ : il faut, dans les hypothèses de production actuelles, en conserver les 2/3⁷.

La thèse de C. Cany⁸ étudie la faisabilité d'un bouquet décarboné EnRi – nucléaire. Les résultats sont les suivants :

- À 2/3 (40 GW) de la puissance nucléaire actuelle (60 GW), le réseau ne tolère que 30 % d'EnRi, avec de nombreux arrêts de réacteurs par an.
- La perte de production nucléaire aura un coût, car les recettes diminuent, tandis que le coût de fonctionnement des réacteurs est en légère hausse, car les cyclages de puissance augmentent les rejets de liquides primaires radioactifs qu'il faut traiter, et les cyclages thermiques nuisent à la longévité des installations. Pour éviter ces variations de puissance imposées par les EnRi, le mieux serait d'utiliser les réacteurs en production mixte électricité + hydrogène.
- Le surinvestissement en éoliennes dû au facteur de charge est au moins d'un facteur 4, et en PV d'un facteur 7. Pour ne pas être obligé d'arrêter la production quand elle dépasse les capacités du réseau, il faudra là aussi utiliser les surcapacités à produire de l'hydrogène. La technologie actuelle est à améliorer, car les électrolyseurs supportent mal les variations de puissance.

Les capacités d'hydrogène ainsi produites pourront être utilisées à différents usages décarbonés : combustible stockable pour produire de l'électricité, avec les pertes dues au rendement de leur combustion ; dilution dans les réseaux de gaz, pour en augmenter le rapport H/C et produire moins de CO₂ par m³ consommé ; mais le meilleur usage vis-à-vis de la décarbonation sera de l'utiliser pour les transports.

5.3. POUR L'EUROPE ET LE MONDE

La prolongation de la durée de vie des réacteurs nucléaires européens dans les conditions de sûreté requises permettra de maintenir puis d'augmenter la part du nucléaire dans la production d'électricité de façon à décarboner l'électricité, en facilitant l'introduction des EnRi et des ENR pilotables, décarbonées ou bas-carbone, en remplacement des centrales thermiques à combustibles fossiles.

Pour les pays peu développés, une formation, non seulement en matière de technologie mais aussi de sûreté nucléaire, doit être fournie aux pays dont la société est stable. L'exemple des Émirats Arabes Unis montre la capacité des pays jeunes à se mettre au niveau rapidement.

Pour les pays moins stables socialement, une solution est de fournir des petits réacteurs scellés, en exploitation sous-traitée, capables, comme ceux des sous-marins, d'une grande agilité en matière de puissance

Comme on l'a vu au § 3.4, le nucléaire sert dans certains pays au chauffage domestique, en complément des autres sources d'énergie. On peut donc imaginer pour le reste du monde un mix électrique décarboné composé d'énergies renouvelables pilotables (hydraulique et biomasse), de nucléaire et d'EnRi, pour produire de l'électricité.

6. CONCLUSIONS

L'orientation que l'Allemagne a prise avec l'*Energiewende* n'est pas la décarbonation mais la sortie du nucléaire. Elle s'avère à contre-courant des besoins mondiaux : les peuples menacés par le changement climatique l'ont bien exprimé à la COP-23.

Il est temps que la France, dont l'électricité est la plus décarbonée des grands pays de l'OCDE, reprenne le flambeau. Les efforts à faire sont dans plusieurs directions :

- 1) Améliorer le nucléaire de grande puissance. Il s'agit de faire la preuve de la viabilité des EPR (4 sont en cours de finition en 2018) puis de les simplifier pour en faire des équipements optimisés exportables. D'autres réacteurs de Génération-3 de moindre taille (ATMEA) sont conçus également en coopération internationale.
- 2) Développer, grâce à l'expérience acquise avec les chaufferies des sous-marins, de petits réacteurs intrinsèquement sûrs, fabriqués en usine et scellés, mis à la disposition des pays qui achèteront l'électricité

⁷ Hervé NIFENECKER, « Stratégie d'évolution du mix électrique français », *Techniques de l'ingénieur*, BE6980 V1, 10 juillet 2014.

⁸ Camille CANY ; « Interactions entre énergie nucléaire et énergies renouvelables variables dans la transition énergétique en France : adaptations du parc électrique à plus de flexibilité » ; *thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay préparée à CentraleSupElec*, 2017.

et la chaleur produite. La reprise des réacteurs et de leur combustible en fin de vie doit être assurée dans la prestation.

- 3) Tester, dans nos îles et territoires d'outre-mer, des solutions énergétiques entièrement décarbonées, incluant hydraulique et géothermie (des profondeurs et de surface), biomasse, EnRi et petit nucléaire d'appoint.

La France a en effet des territoires bien situés au niveau des tropiques (vent), sous les alizés (soleil), avec une forte pluviosité (hydraulique) et possédant des sources géothermales volcaniques, et capables d'une grande production de biomasse. C'est là, et dans les régions métropolitaines mal reliées au réseau (Corse, Bretagne, Côte d'Azur), qu'il est prioritaire d'expérimenter les énergies renouvelables et les réseaux communicants afin de servir de démonstrateurs et de promouvoir la technologie à l'exportation, au lieu de disperser, sans retour industriel ni emplois durables, l'effort financier sur tout le territoire métropolitain.