

ÉLECTRICITÉ 100 % RENOUVELABLE, UNE UTOPIE ?

Pierre Labarbe

Parties des programmes de physique-chimie associées

Programme d'enseignement scientifique de première générale : Thème 2 – Le Soleil, notre source d'énergie

Programme d'enseignement scientifique de terminale générale : Thème 1 – Science, climat et société & Thème 2 – Le futur des énergies

Programme de physique-chimie et mathématiques de première STI2D : Partie Énergie

Programme de physique-chimie et mathématiques de terminale STI2D : Partie Énergie

Mots-clés : énergie, renouvelable, solaire, éolien, électricité, réseau, ressources, stockage

INTRODUCTION

Il y a consensus, les sources d'énergie fossiles sont épuisables. Or, l'humanité n'est pas prête à se passer d'énergie. Pire, elle en consomme de plus en plus. Pourquoi, dans ce cas, ne mettons-nous pas tout en œuvre pour développer la production d'énergie renouvelable ? Le Soleil n'est pas près de s'éteindre, le vent soufflera toujours... Les énergies renouvelables comme l'énergie éolienne et l'énergie solaire sont donc inépuisables ! Dans cette fiche, on s'intéresse à la production d'énergie électrique, qui constitue 25 % du mix énergétique français. On constate alors que le mot renouvelable est trompeur et que l'intégration d'électricité verte dans le réseau existant est en fait plus complexe qu'on l'imagine.



Figure 1 – Pourquoi ne pas recouvrir toutes les surfaces disponibles panneaux photovoltaïques et « inonder » terres et mers d'éoliennes ?
Source : Wikimedia Commons, champs d'éoliennes offshore de Middelgrunden – Kim Hansen ; centrale solaire de Beapouyet – Cjp24.

RENOUVELABLE OU INÉPUISSABLE ?

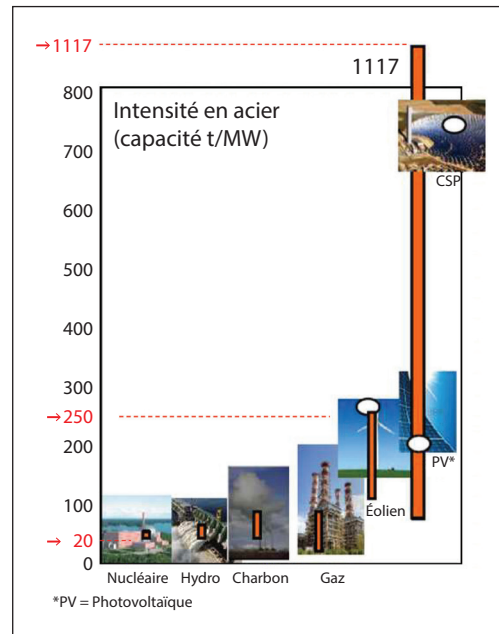
De la ressource existante à la ressource utilisable

Le vent est inépuisable, il est même gratuit. Il en est de même pour le Soleil. Mais avant qu'on les exploite, le charbon et le pétrole sont aussi gratuits. Il faut ainsi distinguer la ressource naturelle et la ressource mise à disposition des utilisateurs. Pour analyser le passage de la première à la deuxième, introduisons la notion d'indice d'intensité matériau. L'énergie ne devient utilisable qu'après qu'une conversion a été effectuée : l'éolienne convertit de l'énergie mécanique en énergie électrique, une centrale à charbon de l'énergie thermique en énergie électrique... Il faut s'intéresser à l'objet qui réalise cette conversion. La fabrication

de cet objet nécessite plusieurs matériaux et on peut définir l'indice d'intensité de chacun d'entre eux comme le quotient de la masse de matériau utilisé par la puissance fournie. On se rend alors compte à quel point la production d'énergie renouvelable est gourmande en matériaux de construction, au regard de la puissance produite.

La construction d'une éolienne off-shore de 150 m d'envergure, capable de produire 6 MW, nécessite par exemple 1 500 tonnes d'acier, ainsi qu'une quantité non négligeable de sable pour le béton et de terres rares (Nd, Dy, Sm, Gd ou Pr) pour les aimants permanents. Ceci lui confère un indice d'intensité en acier (capacité t/MW) de 250, nettement supérieur à celui d'une centrale nucléaire par exemple. Et ce n'est pas mieux pour les centrales solaires, comme le montre la **Figure 2**.

Figure 2 – Indice d'intensité en acier de différentes sources d'énergie [centrale solaire à concentration ou CSP, éolien, nucléaire...].



Les sources sont renouvelables, pas les matériaux

Plusieurs gouvernements affichent leur volonté de développer la production d'énergie renouvelable. De fait, la croissance de cette production est exponentielle et l'objectif est de rester sur cette trajectoire.

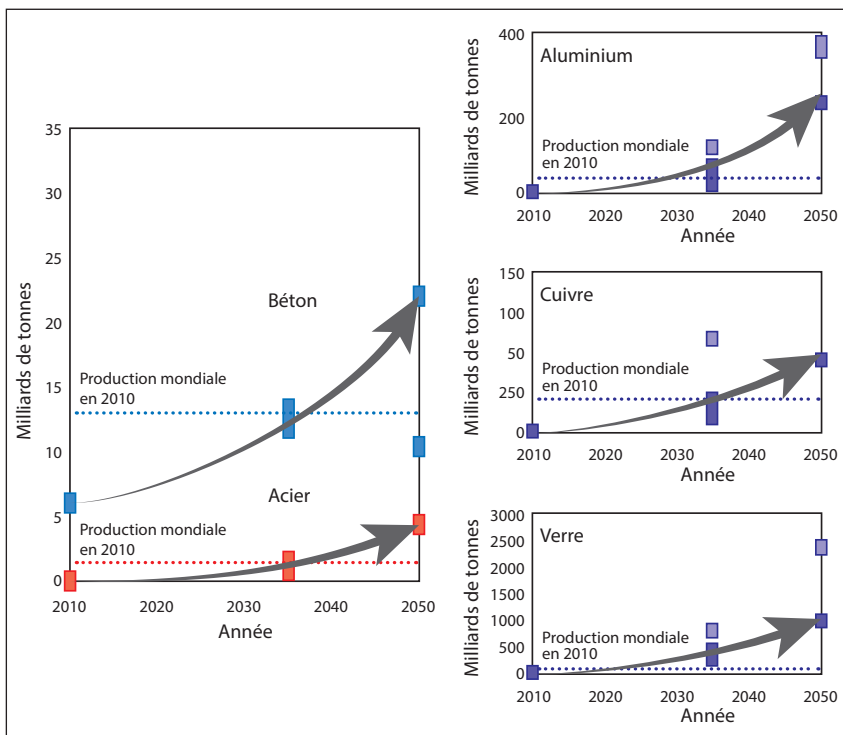


Figure 3 – Besoins en matériau (aluminium, acier, cuivre, verre) corrélées aux prévisions actuelles de développement du photovoltaïque et de l'éolien jusqu'en 2050. En 2050, la quantité cumulée des besoins serait de 2 à 8 fois la production mondiale en 2010.

des éoliennes. Mais des matériaux qui ne sont pas réputés comme aussi rares (comme l'acier, le béton, le cuivre...) viendraient probablement à manquer avant. C'est d'autant plus vrai qu'ils sont aussi impliqués dans d'autres activités (le bâtiment ou le transport par exemple).

On pourrait imaginer d'augmenter parallèlement la production mondiale de ces matériaux, pour suivre les besoins associés aux énergies renouvelables. Mais quel que soit le matériau, si on n'a pas atteint, voire dépassé les capacités maximales de production, on met en évidence que la production d'énergie dite renouvelable nécessite des matériaux qui eux, ne le sont pas.

Mais est-ce bien réaliste ? Si on corrèle la consommation de matériaux aux objectifs affichés en matière de développement de l'éolien et du photovoltaïque, on obtient les courbes de prévision de la **Figure 3**. On constate que ces objectifs impliqueraient des besoins colossaux en matériaux, qui dépasseraient à moyen terme les capacités de production mondiale.

Les objectifs affichés par les politiques ne sont ainsi probablement pas réalistes. Cet exercice d'anticipation est peut-être approximatif, mais il a le mérite d'exhiber de manière assez graphique le caractère limité des énergies renouvelables. On évoque souvent la problématique des terres rares dans la construction des panneaux photovoltaïques ou

Pourrait-on fournir la France en électricité uniquement d'origine éolienne ?

Répondre à cette question est un exercice complètement académique mais permet de contribuer à la réflexion sur le développement des énergies renouvelables.

La *densité de puissance* d'un champ d'éoliennes est de l'ordre de 10 MW/km² (cela peut descendre à 2,5 et atteindre 15 off-shore). Ce chiffre est relativement indépendant de la taille des éoliennes installées. En effet, recourir à des éoliennes plus grandes ne permet pas d'augmenter significativement cette densité car il faut davantage espacer les grandes éoliennes les unes des autres que les petites afin que le vent, qui est perturbé en sortie d'éolienne, soit efficace sur chaque éolienne. Du fait de l'intermittence du vent et de la variation de la puissance délivrée par une éolienne en fonction de la vitesse du vent, tout se passe comme si une éolienne délivrait sa puissance nominale pendant 2 000 heures sur 8 760 chaque année (en Nouvelle Zélande, on atteint 3 500, en Chine on n'est qu'à 1 500). En France, la *densité d'énergie annuelle* est donc de l'ordre de 10 MW/km² × 2 000 h = 20 GWh/km². La consommation électrique française annuelle est de l'ordre de 500 TWh. Pour fournir cette énergie en éolienne il faudrait donc une surface de l'ordre de 500 TWh / 20 GWh/km² = 25 000 km². C'est de l'ordre de 5 % de la surface du territoire, c'est-à-dire la surface de 5 départements ! Il faudrait de plus bien choisir ces départements, car tous n'ont pas le même potentiel éolien et ne sont pas en mesure de fournir les 2 000 h de fonctionnement utiles par an.

Autre façon de voir les choses, une éolienne terrestre a en moyenne une puissance nominale de 2 MW. Elle est donc capable de fournir 2 MW × 2 000 h = 4 GWh par an. Il faudrait installer donc 500 TWh / 4 GWh = 125 000 éoliennes sur l'ensemble du territoire. Cela nécessiterait plus de 50 méga-tonnes d'acier, soit à peu près 50 ans de production française pour ce métal !

Il n'est évidemment pas envisageable de produire toute l'électricité française grâce à l'éolien. Mais on comprend quelle devrait être l'ampleur du chantier, en surface et en matériaux, si on voulait remplacer ne serait-ce que 10 % de l'énergie d'origine fossile par de l'énergie éolienne.

COMMENT INTÉGRER L'ÉLECTRICITÉ VERTE DANS LE RÉSEAU EXISTANT ?

Le réseau d'électricité français, un réseau assez centralisé mais déjà complexe

La France a déjà réalisé une transition énergétique après le choc pétrolier de 1973 (voir Figure 4). Aujourd'hui, la majeure partie de l'énergie électrique française est d'origine nucléaire. Celle-ci est fournie par 58 réacteurs réparties en seulement 19 centrales. Cette part du nucléaire a atteint près de 80 % en 2010, elle est aujourd'hui plutôt de l'ordre de 72 %.

Le réseau français est donc relativement centralisé. Il faut cependant d'ores et déjà 50 000 km de lignes électriques de dimensions variables pour acheminer cette énergie électrique vers les différents lieux de consommations (voir Figure 5).

La production d'énergie éolienne ou solaire est plus **diffuse**. Sa densité est de l'ordre de 2,5 (éolien le moins efficace) à 20 MW/km² (au maximum pour le photovoltaïque). C'est 50 à 100 fois inférieur à la densité d'énergie nucléaire. Une conséquence est que le raccordement au réseau d'éoliennes de panneaux photovoltaïque nécessite davantage de câbles, ce qui est plus coûteux en matériaux et en travaux publics. Pour faire simple, poser 1 câble de 1 GW (ordre de grandeur de la puissance d'un réacteur nucléaire) est plus économique que poser 500 câbles de 2 MW (ordre de grandeur de la puissance d'une éolienne terrestre) pour relier 500 éoliennes au réseau.

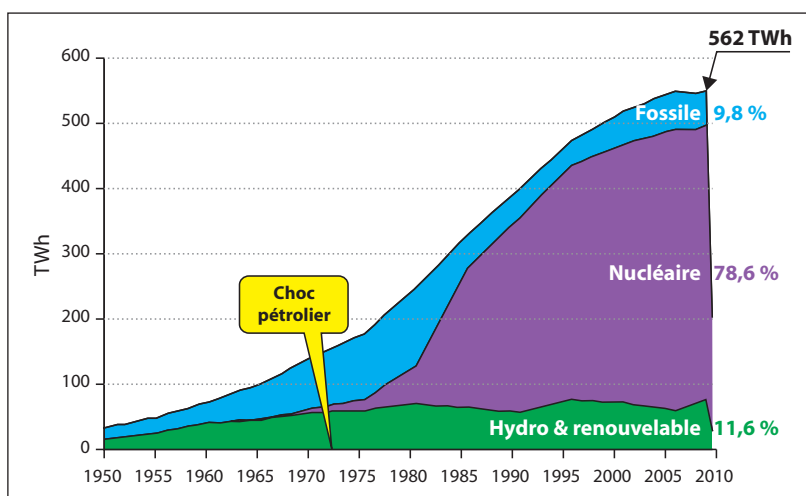


Figure 4 – Évolution des filières énergétiques françaises.
Source : IEA.

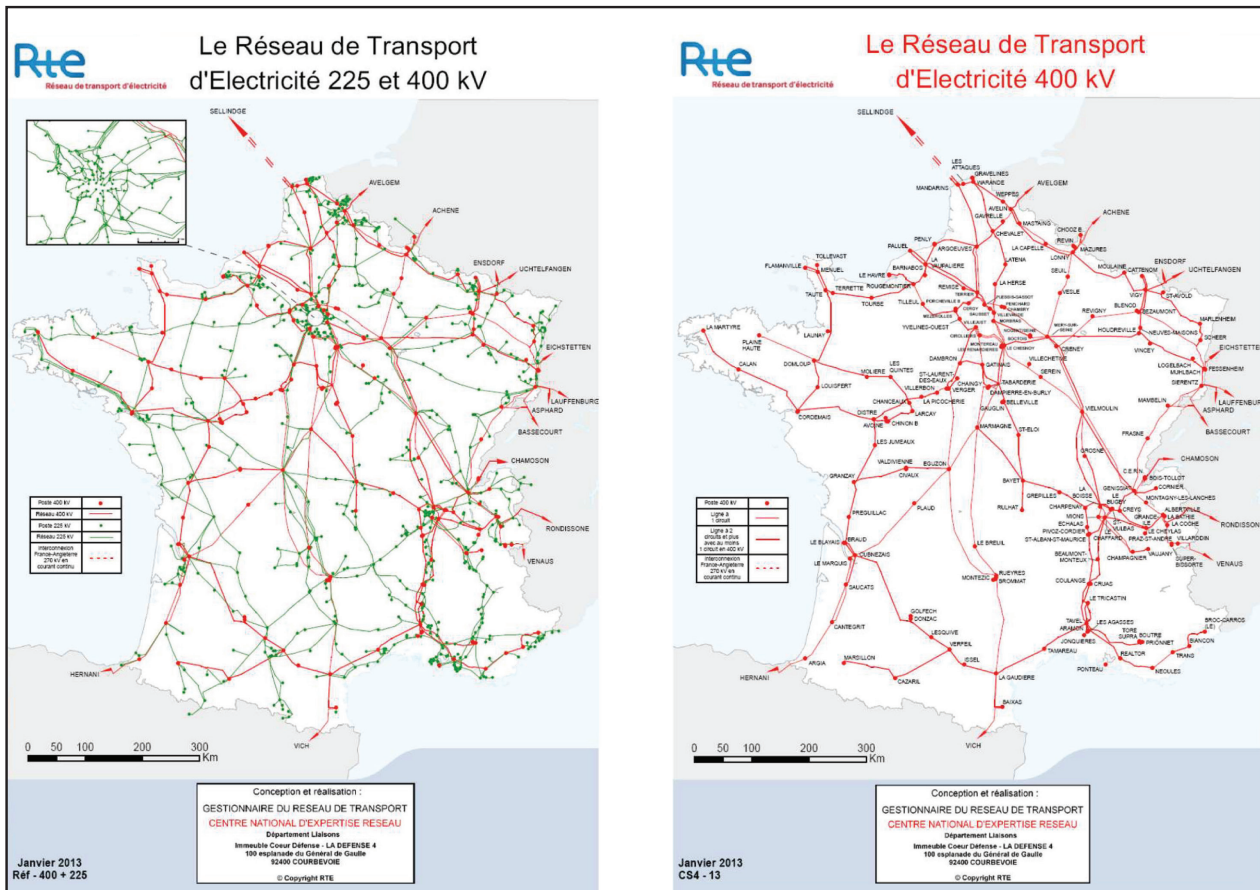


Figure 5 – Le réseau français d'électricité en 225 kV et 400 kV (janvier 2013). Source : RTE.

La gestion de l'intermittence, un casse-tête temporel... et spatial

Un problème majeur de la production d'énergie renouvelable est son caractère intermittent. Ses fluctuations ont parfois une certaine périodicité et sont prévisibles, comme dans les usines marémotrices. Les fluctuations de l'énergie solaire sont elles aussi partiellement saisonnières et prévisibles. Pour l'éolien en revanche, les fluctuations sont permanentes, peu prévisibles et leur variabilité extrême : elle peut être d'une heure, d'une minute et même d'une seconde ! Éolien et solaire sont dits « fatals » car à des moments ils ne produisent pas d'énergie du tout. Ces variations ne sont pas compatibles avec la demande en énergie électrique.

On pourrait imaginer que les manques dans une région soient compensés par les excès de production dans une région voisine. Mais ce n'est pas possible pour l'éolien. Les grandes zones de surpression et de dépression qui créent les vents sont distantes de 200 à 300 km. Mais il faudrait que les besoins en électricité de ces zones voisines soient très différents et ceci est peu probable. La densité démographique est en effet trop élevée et les rythmes de vie sont trop similaires. Les pics de consommation électrique surviennent ainsi en même temps, le matin et en fin de journée. Pour le solaire, c'est un peu différent, mais une chose est sûre, il fait nuit en même temps dans une région et dans la région voisine ! Un autre problème se pose pour l'éolien off-shore. Celui-ci est par définition éloigné des zones de consommation. Son développement serait donc accompagné d'un réseau électrique dédié qui constituerait une pollution visuelle mal acceptée.

Le nécessaire développement de solutions de stockage

Du fait de son caractère intermittent, le développement de la production d'énergie électrique éolienne ou solaire devrait s'accompagner de solutions de stockage. Celles-ci emmagasinerait l'énergie non consommée et la restitueraient pendant les pics de consommation où en l'absence de production. Ce stockage devrait pouvoir être fait au moins sur une durée d'une journée. Plus la part de solaire augmenterait dans le mix énergétique, plus il faudrait allonger cette durée. L'énergie solaire souffre en effet de variations journalières mais aussi intra-saisonnières. La principale réponse en matière de stockage de grande échelle pour faire face aux volumes et

aux durées nécessaires, réside dans les STEP (Station de Transfert d'Énergie par Pompage), qui sont en fait des barrage réversibles (voir Figure 6). De l'eau est pompée depuis un bassin de basse altitude ou d'un cours d'eau, vers un bassin en d'altitude supérieur. L'énergie électrique en surplus est ainsi stockée sous forme potentielle. Elle peut ensuite être à nouveau convertie.

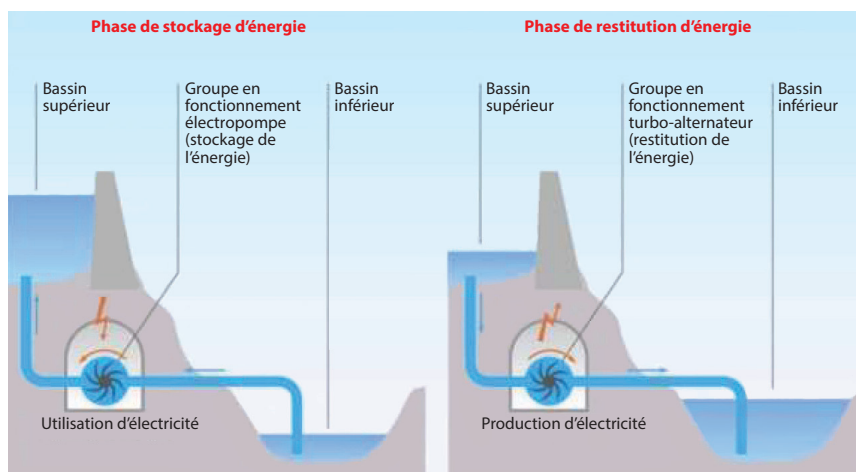


Figure 6 – Schéma d'une STEP (station de transfert d'énergie par pompage) : un barrage à fonctionnement réversible.

Un développement significatif de la production d'énergie renouvelable nécessiterait la construction de nombreuses STEP et ce n'est pas sans poser des problèmes. La construction de barrages entraîne l'inondation de surfaces non négligeables : de l'ordre de 350 km² pour produire 1 TWh/an en France. Elle se fait de plus avec un rendement assez faible : 40 % de l'énergie est perdue au cours des processus d'acheminement et de conversion. Enfin, les investissements en termes d'infrastructure seraient colossaux.

CONCLUSION

Ainsi, le développement d'une électricité renouvelable s'accompagne de nombreuses difficultés. Ce n'est de plus qu'une fraction du problème puisque les 3/4 du mix énergétique ne sont pas électriques. Dans cette fiche, on s'est surtout intéressé à l'éolien et au solaire, mais les autres solutions, comme les biocarburants, ne sont pas idéales non plus et trop peu avancées (voir par exemple « Vers les biocarburants de 2^e génération »). Les énergies fossiles ont permis la croissance économique et nous ont offert un confort individuel jamais atteint, ainsi qu'un accès aisé aux loisirs et à la santé. Changer de modèle énergétique sans renoncer à nos conditions matérielles, est-ce envisageable ? Cela semble complexe et ce sont donc peut-être nos modes de vies plus que notre modèle énergétique qu'il faut interroger. Qui sait, la réponse pourrait ne pas être si désagréable.

SOURCES PRINCIPALES

Chimie et changement climatique, EDP Sciences, 2016, ISBN : 978-2-7598-2035-1,

« La complexité du réseau d'électricité verte » par Yves Bréchet,

https://www.mediachimie.org/sites/default/files/chgt-climatique_p177.pdf

Transition énergétique, Jean-Marc Jancovici,

<https://jancovici.com/category/transition-energetique/>

Mix électrique 100 % renouvelable ? Analyses et optimisations, ADEME,

<https://www.ademe.fr/mix-electrique-100-renouvelable-analyses-optimisations>

Vers les biocarburants de 2^e génération : l'exemple de l'isobutène biosourcé, Pierre Labarbe,

http://www.mediachimie.org/sites/default/files/LYC-02_Biocarburants.pdf

Pierre Labarbe est professeur agrégé de physique-chimie

Comité éditorial : Danièle Olivier, Jean-Claude Bernier et Grégory Syoen