

Limites physiques des énergies renouvelables

Par Ilarion PAVEL

Ingénieur en chef des Mines, Conseil général de l'Économie (CGE)

Cet article passe en revue les différentes sources d'énergie renouvelable (solaire, éolien, bioénergies, géothermie et hydroélectricité) et évalue leur potentiel sur le territoire français en calculant le flux d'énergie moyen disponible. Est également abordée la perspective d'amélioration du rendement de conversion de chacune de ces formes d'énergie en énergie électrique.

Introduction

La consommation moyenne d'énergie primaire par habitant ⁽¹⁾ varie fortement d'un pays à l'autre. La moyenne mondiale se situe à environ 2,5 kW, les pays de l'Europe de l'Ouest consomment autour de 5 kW, alors que les États-Unis, le Canada et l'Australie se situent plutôt vers les 10 kW.

Représentons ces données sur un graphique avec, en ordonnées, la puissance consommée moyenne et, en abscisses, la densité de population. Nous allons effectuer le produit entre ces deux quantités pour obtenir une puissance par unité de surface, que nous pouvons interpréter comme le flux d'énergie ⁽²⁾ moyen à produire sur un territoire afin de satisfaire les besoins énergétiques de la population qui y habite ⁽³⁾.

(1) Représente la totalité de l'énergie primaire consommée pendant une année par un pays, divisée par le nombre d'habitants et par le nombre de secondes de l'année. On l'exprime en kW/habitant.

(2) Nous rappelons que le flux d'énergie représente la puissance par unité de surface.

(3) Nous faisons l'hypothèse d'une autarcie énergétique au niveau du pays considéré ; on néglige donc les échanges frontaliers.

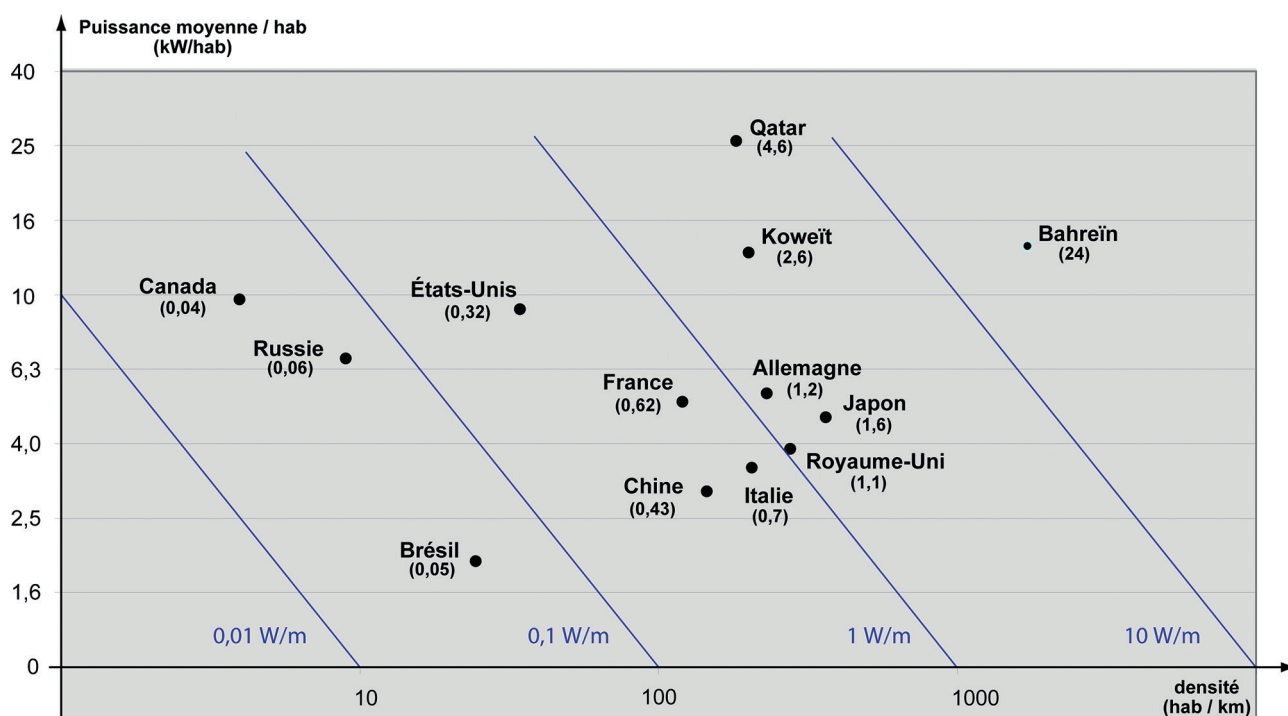


Figure 1 – Réalisée par l'auteur.

La consommation moyenne pour la France est de 0,62 W/m², pour l'Allemagne de 1,2 W/m² (même consommation par tête d'habitant, mais densité double), et pour les États-Unis de 0,32 W/m² (consommation double par tête d'habitant, mais densité six fois plus faible).

Par la suite, nous allons estimer le flux d'énergie en provenance des différentes sources d'énergie renouvelable (solaire, éolien, bioénergies, géothermie et hydroélectricité), dont on dispose sur le territoire français, en optant pour les hypothèses les plus optimistes. Nous allons également examiner les perspectives d'amélioration du rendement de conversion de ces différentes sources d'énergie en énergie électrique.

Solaire

Le flux solaire moyen annuel mesuré sur le territoire français est de 145 W/m². Avec les meilleurs dispositifs photovoltaïques commercialisés, dont le rendement de conversion est de 15 à 20 %, dans le meilleur cas ⁽⁴⁾, on peut récupérer un flux d'énergie de 20 à 30 W/m². Considérons alors une valeur moyenne de 25 W/m².

Le rendement théorique maximal des cellules photovoltaïques unijonction en silicium est de 31 % (limite Shockley – Queisser ⁽⁵⁾). On peut dépasser cette limite en utilisant des dispositifs de concentration (lentilles, miroirs paraboliques) et en mettant au point des cellules multijonctions, qui exploitent mieux la fenêtre spectrale ⁽⁶⁾. Le rendement maximal atteint en laboratoire par une telle cellule est de 46 % ⁽⁷⁾. Nous avons en principe de bonnes perspectives d'amélioration des rendements actuels. Il se pose bien entendu la question de l'industrialisation de ce type de dispositifs ainsi que celle de leur viabilité financière.

Éolien

L'énergie éolienne est en fait dérivée de l'énergie solaire, conséquence du réchauffement non uniforme de la surface terrestre par le soleil, ce qui engendre la circulation des masses d'air sous forme de vents.

Une turbine éolienne convertit l'énergie cinétique du vent en énergie de rotation de la turbine, puis en électricité à l'aide d'un générateur. La puissance du vent disponible par unité de surface (de la turbine) est facile à estimer ⁽⁸⁾ et les rendements actuels des éoliennes avoisinent les 50 %. Malheureusement, placer une éolienne dans l'im-

mediate proximité d'une autre engendre des perturbations, le sillage de l'une influençant fortement le fonctionnement de l'autre et conduisant à une chute de leurs rendements respectifs. En pratique, les constructeurs placent les éoliennes à des distances moyennes correspondant à cinq fois le diamètre de la turbine ⁽⁹⁾.

Ainsi, pour une vitesse moyenne du vent de 6 m/s sur le territoire français, on peut estimer que le flux d'énergie éolienne ⁽¹⁰⁾ que l'on peut récupérer se situe autour de 2 W/m². Des données observées sur les fermes éoliennes terrestres confirment cette valeur ⁽¹¹⁾.

On ne peut guère améliorer le rendement de conversion, car la limite théorique du rendement d'une éolienne (théorème de Betz ⁽¹²⁾) est de 59 %.

Bioénergies

La photosynthèse permet, à l'aide du soleil, de synthétiser, à partir de l'eau, du dioxyde de carbone et quelques minéraux, des substances organiques essentielles pour la vie sur Terre. Ces substances photosynthétisées possèdent des potentiels énergétiques supérieurs aux substances d'origine. Les bioénergies ne sont alors qu'une des formes de stockage de l'énergie solaire. Pour la libérer, il suffit de dégrader les produits de la photosynthèse en dioxyde de carbone et en eau. Il est d'ailleurs à noter que les combustibles fossiles que nous utilisons à grande échelle aujourd'hui et que nous nous efforçons de remplacer, ne sont que des bioénergies accumulées dans les couches géologiques pendant des millions d'années d'histoire de la Terre.

Malheureusement, la photosynthèse présente un faible rendement. Les meilleurs résultats obtenus en laboratoire, dans une atmosphère spéciale ⁽¹³⁾, ne dépassent pas 12 %. Dans les conditions de l'atmosphère terrestre, la photosynthèse chute à 3 %. Si l'on prend en compte la variabilité saisonnière des cultures ⁽¹⁴⁾ propre au terri-

(9) En fait, les éoliennes sont placées en ligne, par exemple sur une crête, elles doivent alors être situées à une distance minimale égale à trois fois le diamètre du rotor ; si elles sont placées en damier, cette distance est plutôt de sept fois le diamètre.

(10) Voir, par exemple, MACKAY David, *Sustainable Energy – Without hot air* (www.withouthotair.com).

(11) Le parc éolien de Whitelee (Royaume-Uni), qui comprend 215 turbines sur une surface de 80 km², a une puissance nominale de 539 MW, pour un facteur de charge de 27 %, ce qui donne un flux d'énergie de 1,8 W/m². Les parcs éoliens *off-shore* produisent en moyenne 3 W/m², la vitesse du vent étant plus importante dans l'environnement côtier. Dans certains endroits où les vents sont forts, comme le littoral néerlandais, on peut obtenir 5 W/m², voir le rapport « Capacity Densities of European Offshore Wind Farms », Deutsche WindGuard, 2018.

(12) MACKAY David, *Sustainable Energy – Without hot air* (www.withouthotair.com).

(13) On augmente la concentration du dioxyde de carbone pour accélérer la photosynthèse, et on diminue la concentration de l'oxygène pour limiter la photorespiration (processus parasite qui perturbe la photosynthèse et qui est dû à la concentration de l'oxygène produit par photosynthèse).

(14) C'est seulement en été que la photosynthèse atteint son maximum : en automne, les feuilles tombent ; l'hiver, c'est le repos hivernal ; au printemps, les bourgeons sortent à peine. À cela, il faut rajouter le fait que les feuilles n'ont pas toujours l'orientation optimale pour capter le flux de lumière. Voir HERMANS Jo, *Energy Survival Guide*, Leiden University Press, 2011.

(4) Nous allons faire les hypothèses les plus favorables pour estimer en fait une limite supérieure du flux d'énergie.

(5) SHOCKLEY W. & QUEISSER H. J. (1961), *J. Appl. Phys.* 32, 510.

(6) Ces dispositifs photovoltaïques sont composés de plusieurs jonctions semi-conducteurs à base d'indium, de gallium, d'arsenic et de germanium, chaque jonction étant capable de transformer la lumière d'une plage de fréquence donnée en courant électrique. Le rendement de conversion est ainsi amélioré ; en contrepartie, la fabrication de tels composants demande la mise en œuvre de technologies plus élaborées, dont plus chères que la technologie traditionnelle à base de silicium, utilisée actuellement pour les dispositifs commercialisés.

(7) Atteint en 2014 grâce à une collaboration entre des laboratoires du CEA-Leti et du Fraunhofer ISE et l'entreprise Soitec. Le rendement théorique maximal se situe autour de 85 %.

(8) Celle-ci est proportionnelle à la densité de l'air et au cube de la vitesse du vent.

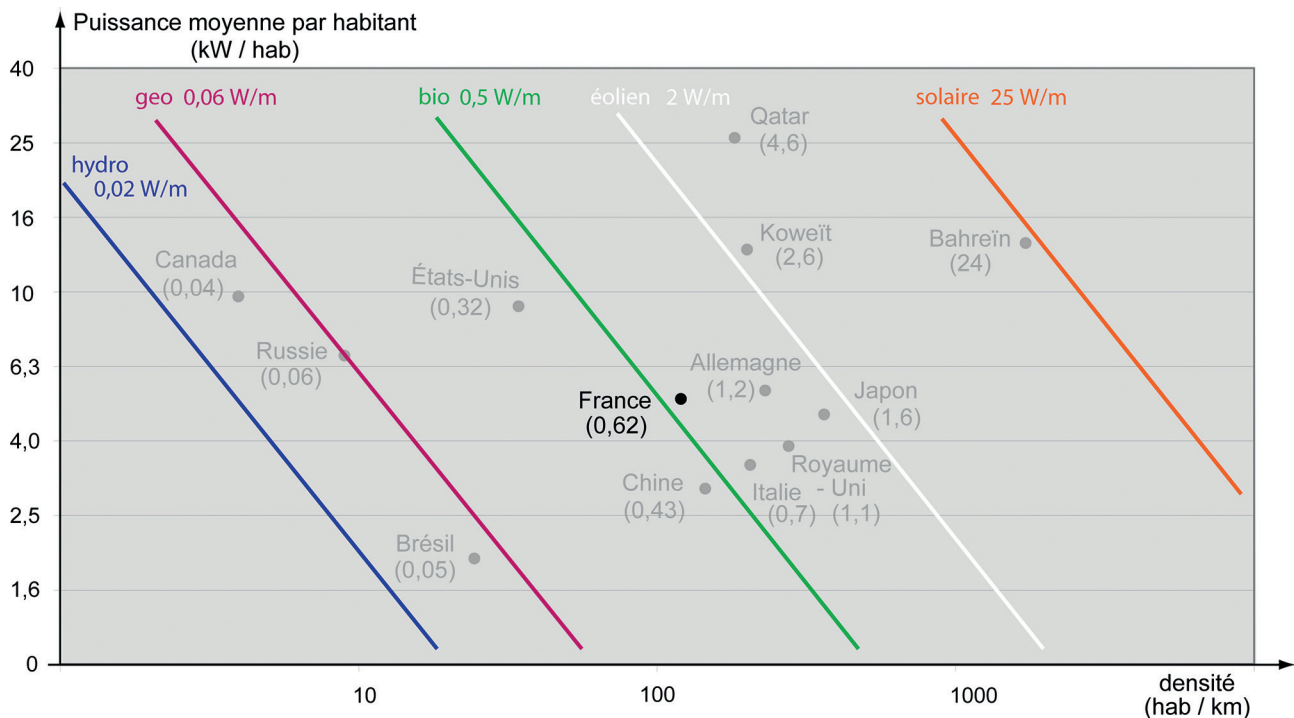


Figure 2 – Réalisée par l'auteur.

toire français, le rendement moyen annuel de la photosynthèse est inférieur à 0,3 %. Avec un flux solaire moyen de 145 W/m², on peut difficilement atteindre 0,5 W/m², valeur confirmée par diverses réalisations expérimentales ⁽¹⁵⁾.

Peut-on améliorer le rendement de la photosynthèse ? Probablement, mais dans un avenir très lointain, grâce aux progrès des biotechnologies. Pour l'instant, nous devons nous contenter de ce que la nature nous offre, et il reste aujourd'hui difficile de faire mieux que les arbres.

Géothermie

L'énergie géothermique est pratiquement d'origine nucléaire. La chaleur interne de la Terre est produite en grande partie par la désintégration radioactive ⁽¹⁶⁾ des uraniums 235 et 238, du thorium 232 et, dans une moindre mesure, du potassium 40.

Le flux moyen de cette source d'énergie est obtenu par la loi de Fourier, le produit du gradient de température par la conductivité thermique de la croûte terrestre ⁽¹⁷⁾ : on obtient environ 0,06 W/m². Bien entendu, ce résultat peut être meilleur, si l'endroit est dans le voisinage d'un aquifère en contact avec des zones chaudes, ou sur une dorsale, comme c'est le cas de l'Islande.

On utilise cette source d'énergie pour le chauffage domes-

tique. Mais dans certains cas particuliers (exploitation de geysers), on peut produire de l'électricité, malheureusement avec un faible rendement, les meilleurs ⁽¹⁸⁾ ne dépassant pas 21 %.

Hydroélectricité

L'énergie hydroélectrique est d'origine solaire. La chaleur produite par le soleil transforme l'eau en vapeur, qui, entraînée par les courants ascendants, arrive dans les couches froides de l'atmosphère, se condense et tombe sous forme de pluie.

Le potentiel hydroélectrique d'un pays peut être évalué à partir de la carte des précipitations annuelles et de la carte du relief de son territoire : il suffit de calculer l'énergie potentielle de la quantité d'eau de pluie accumulée pendant une année en tenant compte des différences de hauteur du relief par rapport au niveau de la mer ⁽¹⁹⁾.

En fait, ce sont les régions montagneuses qui apportent la plus grande contribution, puisque les montagnes sont plus hautes et qu'il pleut plus qu'en plaine.

À partir des données disponibles pour la France ⁽²⁰⁾, on arrive au résultat de 0,02 W/m².

(15) Rapport « Bilan énergétique et gaz à effet de serre des filières de production de biocarburants en France », ADEME/DIREM, 2002.

(16) Il existe d'autres contributions à la chaleur interne de la Terre, moins importants : solidification du noyau de la Terre, chute gravitationnelle vers le centre de la Terre d'éléments lourds comme le fer ou le nickel, forces des marées du soleil et de la lune qui déforment la croûte terrestre.

(17) À chaque enfoncement d'un kilomètre dans la croûte terrestre, la température augmente de 30° C. La conductivité de la croûte est d'environ 2 W/m K.

(18) MOON H. & ZARROUK S. J., "Efficiency of geothermal power plants: a worldwide review", *Zealand Geothermal Workshop 2012 Proceedings*, 19-21 November, Auckland, New Zealand.

(19) Nous négligeons les pertes liées aux infiltrations dans le sol ou à l'évaporation.

(20) Nous ne prenons pas en compte la contribution des rivières dont une partie importante de leur eau vient d'un territoire situé à l'étranger, ni celles qui s'étendent au-delà du périmètre de notre pays. Cependant, l'étude « Connaissance du potentiel hydroélectrique français », réalisée en 2013 par le ministère en charge de l'Environnement, a évalué, cours d'eau par cours d'eau, le potentiel hydroélectrique à 78 TWh/an, ce qui rapporté à la surface de la France, équivaut à un flux de 0,016 W/m².

Le rendement des turbines hydroélectriques se situe aux alentours de 90-95 %. Cette technologie est mature et il sera difficile de réaliser des améliorations substantielles.

Conclusion

Nous avons reporté dans le graphique de la page précédente les lignes de flux constants d'énergie pour les énergies solaire, éolienne, bioénergies, géothermique et hydraulique. Ces résultats ne sont valables que pour le territoire français (sont néanmoins mentionnées pour mémoire les valeurs de consommation des différents pays figurant dans la Figure 1 de la page 86).

Le solaire, avec un flux de 25 W/m^2 , est de loin la source d'énergie la plus concentrée. Couvrir 3 % de la surface du territoire avec des panneaux photovoltaïques pourrait satisfaire les besoins énergétiques du territoire. La perspective d'amélioration du rendement de ces dispositifs en fait les candidats les plus sérieux parmi les différentes sources d'énergie renouvelable. Il reste bien entendu plusieurs problèmes difficiles à résoudre, en particulier le stockage nécessaire pour pallier la variabilité, notamment la variabilité saisonnière.

L'éolien présente un flux de 2 à 3 W/m^2 . Il faudrait alors couvrir un tiers de la surface de la France d'éoliennes

pour satisfaire les besoins énergétiques de notre pays ! Le rendement actuel des éoliennes est proche de la limite théorique, les marges d'amélioration sont donc faibles. On peut le développer dans les territoires où les conditions météo sont favorables. Mais il ne faut pas compter sur l'éolien pour remplacer l'ensemble des énergies non renouvelables.

Les bioénergies ont des flux de $0,5 \text{ W/m}^2$. Mais même si l'on couvrait l'intégralité du territoire français de biocultures, cela ne suffirait pas pour satisfaire l'intégralité de nos besoins énergétiques. Ce type de technologie est peu exigeant et pourrait être approprié pour des pays comme le Brésil. En ce qui concerne la France, bien que le déploiement actuel d'une telle source d'énergie semble absurde, il sera néanmoins opportun de continuer les recherches dans ce domaine afin de mettre au point des souches performantes qui pourront être utilisées dans d'autres pays.

La géothermie et l'hydroélectricité, avec des flux modestes de respectivement $0,06$ et $0,02 \text{ W/m}^2$, sont loin de pouvoir couvrir nos besoins énergétiques. En revanche, les technologies mises au point peuvent être utilisées dans le stockage de l'énergie, lequel est nécessaire pour pouvoir résoudre le délicat problème de la variabilité des sources solaire et éolienne, d'autant plus que nous ne disposons aujourd'hui d'aucune solution satisfaisante en la matière.