

# L'efficacité des énergies primaires dans la génération électrique. Quelques indicateurs de comparaison

Philippe Charlez<sup>1</sup>.

## Introduction

Principal combustible utilisé par l'homme jusqu'à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle, le bois aurait pu continuer son histoire énergétique et nourrir les machines à vapeur de la révolution industrielle. Mais, son utilisation massive aurait rapidement débouché sur une pénurie, conduit à l'explosion des cours et à la destruction massive des forêts. Beaucoup plus économique et possédant un pouvoir calorifique deux fois supérieur, le charbon devient, durant la seconde moitié du XIX<sup>e</sup> siècle, le principal aliment des machines à vapeur et des premières centrales électriques. Au début du XX<sup>e</sup> siècle, le monde de l'énergie se partage ainsi entre 50% bois et 50% charbon.

Le pétrole s'installe comme énergie du futur dans le bouquet énergétique durant la première guerre mondiale, sous l'impulsion de Winston Churchill convaincu que la propulsion au fuel, dont le pouvoir calorifique est le double de celui du charbon, donnera un avantage décisif à la Royal Navy. Et durant le second conflit mondial, il sera le principal enjeu de la victoire des alliés. Quand les allemands forcent les frontières de l'Union Soviétique le 22 juin 1941, l'attaque intègre un objectif clé : le pétrole d'Azerbaïdjan. Bloquée à Stalingrad, la Wehrmacht n'atteindra jamais les bords de la mer Caspienne. Mais, l'âge d'or du pétrole ne durera finalement qu'une vingtaine d'années. Devenu trop cher, il abandonnera progressivement ses parts de marché dans la génération électrique et le chauffage urbain. Après les deux chocs pétroliers, il se spécialisera dans les transports et l'industrie pétrochimique ce qui en fait aujourd'hui à la fois son originalité et sa force.

Au milieu des années 50, à la suite de la découverte du champ de Groningue en Hollande et du champ de Lacq en France, le méthane ou gaz naturel va rapidement supplanter le gaz de ville généré à partir de... charbon. En dehors de la cuisine et du chauffage urbain, le méthane va devenir un combustible incontournable de la génération électrique en remplacement du fuel et du charbon.

Spécialisé dans les transports et la pétrochimie, le pétrole n'est presque plus utilisé dans la génération électrique. Aussi ne concurrence-t-il pas les autres énergies primaires (charbon, gaz, nucléaire, hydro, éolien et solaire) toutes sans exception massivement utilisées pour fabriquer l'électricité. Fin 2014, 40% de l'électricité produite

dans le monde était charbonnière, 23% gazière, 5% pétrolière et 32% d'origine non fossile (16% d'hydroélectrique, 11% de nucléaire et 5% pour l'ensemble biomasse+éolien+solaire).

Socle commun de toutes les énergies primaires, la génération électrique représente donc un moyen intéressant et pertinent pour comparer leur efficacité.

## La surface au sol

De par leur pouvoir calorifique, **le pétrole et le gaz représentent des concentrés énergétiques exceptionnels**. Une tonne de pétrole contient deux fois plus d'énergie qu'une tonne de charbon et trois fois plus qu'une tonne de bois. Mais tout cela n'est rien au regard de la pharamineuse quantité d'énergie concentrée dans un seul puits de pétrole conventionnel. Occupant en moyenne une surface au sol d'un demi-hectare (l'équivalent d'un terrain de football), il produira durant une trentaine d'années 3 Mbbl de pétrole soit l'équivalent de 4,6 TWh. Sur la même période, une surface équivalente de forêt ne produira que 250MWh<sup>2</sup>. Il faudra donc 9 200 ha de forêt pour produire, avec du bois, une quantité d'énergie équivalente.

Et l'histoire ne s'arrête pas là ! Au cours de la première moitié du XX<sup>e</sup> siècle, les champs d'hydrocarbures à terre ont été développés à l'aide de nombreux puits verticaux rapprochés. Mais, au cours des 30 dernières années l'industrie pétrolière a mis en œuvre des modes de production beaucoup plus économes en termes de surface au sol. Le « PAD<sup>3</sup> » consiste à forer plusieurs puits horizontaux (une dizaine en moyenne) à partir d'une surface limitée à deux ou trois terrains de football. Ce concept permet de réduire de façon spectaculaire la surface au sol. Il représente un concentré énergétique saisissant puisqu'à partir d'une surface comprise entre un et deux hectares, on arrive à collecter le pétrole sur plus de dix kilomètres carrés en profondeur.

Comme le pétrole et le gaz, les autres énergies contenues dans le sous sol (charbon et nucléaire) sont également d'étonnants concentrés énergétiques. On comprend mieux pourquoi la révolution industrielle s'est assez vite désintéressée du bois et s'est rapidement spécialisée dans les énergies fossiles. Et on saisit aussi pourquoi le solaire et l'éolien qui cherchent à capter l'énergie dans l'at-

1. Total Exploration Production. Courriel : philippe.charlez@total.com  
Site internet [www.philippecharlez.com](http://www.philippecharlez.com)

2. Supposant 180 m<sup>3</sup> de bois de densité 0,7 t/m<sup>3</sup> par hectare sur trente ans soit environ 126 tonnes par hectare. Avec un pouvoir calorifique de 4MWh/tonne cela fait donc 500 MWh/h.

3. Superficie nécessaire pour forer une dizaine de puits.

mosphère ont tant de mal à rivaliser avec les « *énergies du sous-sol* ».

En tenant compte des différents rendements électriques (voir paragraphe suivant), l'éolien et le solaire demandent en effet entre 180 et 670 fois plus de surface au sol que le gaz conventionnel (Fig. 1) pour générer la même quantité d'électricité. Et quant aux gaz de schiste que l'on accuse d'avoir une emprise au sol beaucoup trop importante, ils demanderont à capacité électrique équivalente, entre 30 et 100 fois moins de surface au sol que le solaire et l'éolien.

Aussi, pour satisfaire la consommation annuelle d'électricité de la France (550 TWh) à l'aide de renouvelables seulement, il faudrait installer 125 000 éoliennes (contre moins de 5 000 aujourd'hui) de 2MW (puissance actuelle des éoliennes françaises) sur plus de 8 000 km<sup>2</sup> ou des panneaux photovoltaïques sur environ 2 200 km<sup>2</sup>. Si ces surfaces restent en apparence faibles par rapport aux 550 000 km<sup>2</sup> du territoire, elles représenteront inévitablement un facteur bloquant en région fortement urbanisée. D'autant que pour les éoliennes, nous devons considérer dans notre calcul un coefficient d'occupation du sol de 10%. Autrement dit ce sont 80 000 km<sup>2</sup> (soit 15% du ter-

ritoire métropolitain) et non 8 000 km<sup>2</sup> qui seraient globalement occupés. Et même si, entre les éoliennes, une grande partie de la surface pourrait être utilisée à des fins agricoles ou domestiques, cela représenterait une nuisance territoriale considérable.

Quant aux biocarburants (3% des combustibles utilisés dans les transports), **leur bilan surfacique est encore plus effrayant que celui du bois**. À quantité d'énergie équivalente, de l'éthanol fabriqué avec la canne à sucre demandera 12 000 fois la surface au sol requise par les hydrocarbures conventionnels et 2 000 fois celle requise par les hydrocarbures non conventionnels (Fig. 2). À partir de blé ou de maïs dont les rendements sont deux fois inférieurs, il faudra encore doubler ces surfaces.

Au regard de l'occupation au sol, le solaire photovoltaïque s'avère donc de loin la solution la moins contraignante.

### Le rendement des cycles électriques

Hormis le solaire photovoltaïque dont le principe physique est fondamentalement différent, tous les procédés de génération électrique sont basés sur le même procédé. Une énergie primaire actionne directement (gaz, vent, hydraulique) ou indirectement (vapeur produite à partir du charbon, du fuel ou du nucléaire) une turbine qui à son tour entraîne le rotor d'un alternateur.

La transformation se réalise avec une efficacité plus ou moins grande qu'on appelle « *rendement* ». Dans la mesure où l'alternateur est commun à tous les procédés, le rendement d'un cycle électrique repose en grande partie sur l'efficacité des éléments situés en amont. Autrement dit, c'est la transformation d'énergie primaire en énergie mécanique qui va différencier l'efficacité des différents procédés de fabrication.

L'énergie hydraulique possède de loin le meilleur rendement puisqu'aux pertes par frottement près, il approche les 100%. L'éolien peut en théorie également fournir des rendements théoriques approchant les 60%, mais ceci, à condition de fonctionner dans sa plage nominale là où le rotor tourne suffisamment vite sans pour autant excéder une vitesse maximale au-delà de laquelle il risque de s'endommager. En pratique, les éoliennes ne récupèrent que 40% de l'énergie primaire du vent.

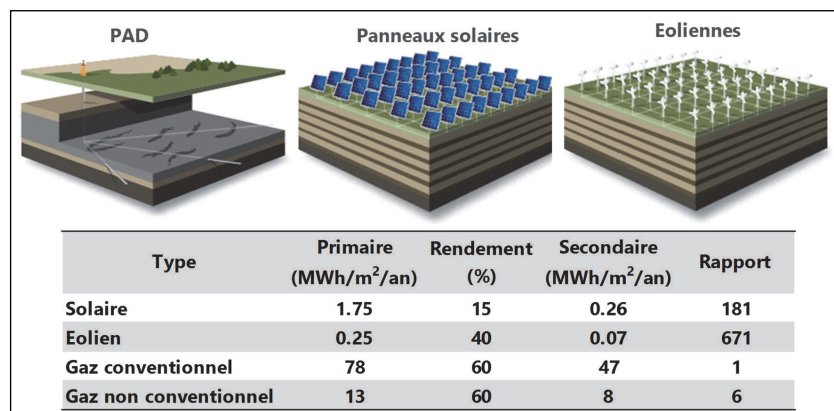


Figure 1. Comparaison de la surface au sol requise entre les énergies renouvelables, le gaz conventionnel et le gaz non conventionnel<sup>3</sup>.

Végétal	Rendement agricole (m <sup>3</sup> éthanol/ha*an)	Rendement énergétique (GWh/km <sup>2</sup> *an)	Rapport de surface	Eau (m <sup>3</sup> /GWh*an)
Blé	2.5	3	29839	3300
Mais	3	3	24866	2900
Betterave	5	5	14920	2000
Canne à sucre	6	6	12433	3100
Hydrocarbures conventionnels		78000	1	1
Hydrocarbures non conventionnels		13000	6	0.051

Figure 2. Comparaison de la surface au sol pour différents biocarburants et les hydrocarbures (source : AIE et banque mondiale).

3. On a considéré des PADs de 10 puits occupant 2 hectares. Chaque puits produit sur 30 ans 3 millions de baril équivalent pétrole pour le conventionnel, 0,5 million de baril équivalent pour le non conventionnel. L'efficacité du cycle gaz combiné est de 60%. Un flux solaire de 600 W/m<sup>2</sup> a été considéré avec 8 heures d'ensoleillement par jour et un rendement de 15% pour les cellules photovoltaïques. <http://zebu.uoregon.edu/disted/ph162/l4.htm> Les éoliennes ont une puissance de 2MW et occupent chacune une surface de 0,64 km<sup>2</sup> (elles sont distantes de 800 m). 10% de la surface totale seulement est considérée comme surface utile. Elles sont supposées fonctionner 15 heures par jour.

Le rendement des cycles thermiques à combustion interne (turbines à gaz) ou à combustion externe (turbine à vapeur), est conditionné par la thermodynamique et ne peut être supérieur à celui du cycle de Carnot. En moyenne il n'excède pas 35%.

Quant au solaire photovoltaïque qui génère de l'électricité à partir de l'effet photoélectrique (électrons arrachés à la matière par la lumière), son rendement est désespérément faible. En moyenne il est compris entre 10% et 15% et n'excède pas 20%. On pourrait penser que cela n'a finalement que peu d'importance dans la mesure où l'énergie solaire est gratuite. Un raisonnement pourtant trompeur. Car, en augmentant le rendement des cellules photovoltaïques, à surface au sol équivalente, on diminue proportionnellement le prix du MWh. L'avenir économique du solaire passe donc par l'amélioration du rendement des cellules photovoltaïques. Il s'agit d'un axe de recherche majeur pour les renouvelables.

### Les marges de progrès

*Pour les cycles thermiques*, l'amélioration du rendement passe par l'utilisation pertinente de la chaleur fatale pour produire soit de l'eau chaude (cogénération) soit de la vapeur à partir des fumées résultant de la combustion du gaz (cycle combiné gaz/vapeur). Dans les deux cas, le procédé permet d'accroître le rendement au-delà de 60%. Quand on sait que la production d'électricité consomme 37,5% de l'énergie primaire mondiale, le doublement théorique du rendement permettrait de réduire de près de 20% la consommation mondiale. Il s'agit donc d'un enjeu majeur de la transition énergétique.

Rehausser le mât et augmenter la longueur des pales permet d'augmenter *la puissance d'une éolienne*. En France, la plupart des éoliennes ont des mats de 100 mètres et des pales de 45 m. Leur puissance n'excède pas 2MW. Certains modèles, encore rares, installés en Allemagne utilisent des pales de plus de 60 m fixées à un mât de 130 m. Leur puissance flirte avec les 6 MW. Au cours des 10 prochaines années, des éoliennes de 10 MW pourraient voir le jour.

*Le rendement des cellules photovoltaïques* augmente avec l'intensité de l'ensoleillement mais diminue avec la température, chaque degré de réchauffement faisant perdre 0,5% de rendement. Aussi, dans des régions très ensoleillées mais aussi très chaudes comme le Sahara ou le désert saoudien faut-il refroidir les cellules. Mais, le rendement dépend aussi du procédé de fabrication. La plupart des cellules photovoltaïques actuelles utilisent le silicium comme matériau semi conducteur soit sous forme monocristalline soit sous forme poly-cristalline.

Coût et rendement vont de pair : le silicium monocristallin est un procédé onéreux qui offre un rendement élevé alors que la forme poly-cristalline est moins coûteuse mais fournit des rendements inférieurs. Les cellules de seconde génération (dépôt d'une couche mince de matériau semi-conducteur sur du verre) sont nettement moins coûteuses mais leur rendement est inférieur. L'adéquation coût/rendement/surface au sol du photovoltaïque représente donc un enjeu majeur de la transition énergétique.

### La consommation en eau

*La génération électrique est également un important consommateur d'eau.* Sachant qu'un MWh d'électricité thermique (charbon/fuel/nucléaire) requiert  $2\text{ m}^3$  d'eau pour produire la vapeur et refroidir le procédé, les 450 TWh thermiques consommés chaque année en France réclament environ un milliard de mètres cubes d'eau. En comparaison l'Hexagone en consomme chaque année 30 milliards. Le cycle thermique gaz qui ne requiert pas de production de vapeur (sauf dans le cas d'un cycle combiné) en consomme la moitié soit environ  $1\text{ m}^3/\text{MWh}$ .

Il est à nouveau à ce stade intéressant de regarder le cas des hydrocarbures non conventionnels, souvent décriés pour leur consommation abusive d'eau. Un puits de gaz de schistes qui produira durant sa vie de l'ordre de 750 000 MWh demande environ 20 000  $\text{m}^3$  d'eau (pour effectuer la fracturation hydraulique) dont 60% restera piégée dans la formation. La consommation effective d'eau est donc de l'ordre de **16 litres d'eau par MWh à comparer avec les... 276  $\text{m}^3/\text{MWh}$**  requis pour produire de *l'éthanol à partir de la canne à sucre* (Fig. 3).

### Flexibilité et intermittences

La consommation d'électricité n'est pas, loin s'en faut, constante dans le temps. Elle varie suivant la température et la luminosité, selon l'heure de la journée et la saison. Satisfaire les pics et éviter de surproduire pendant

Énergie	$\text{M}^3/\text{MWh}$
Centrale nucléaire	2,1
Centrale à charbon	1,9
Centrale à gaz	1
Hydrocarbures NC	0,023
Éthanol	276

Figure 3. Consommation d'eau des différents cycles thermiques, des hydrocarbures non conventionnels et de la production d'éthanol.

Type de production	Puissance (GW)	Production (TWh)	% génération électrique	Efficacité (TWh/GW)
Eolien	10	20	3.5%	2.0
Solaire	6.5	7.3	1.3%	1.1
Nucléaire	66	437	76.9%	6.6

Figure 4. Rapport entre puissance et énergie de différentes sources de génération électrique en France (source : BP energy outlook 2016).

les périodes de faible demande, réclame donc beaucoup de flexibilité. Contrairement aux combustibles fossiles, l'électricité n'est pas aujourd'hui directement stockable. Si, une fois produite, elle n'est pas instantanément consommée, elle sera irrémédiablement perdue. La flexibilité réside donc d'abord et avant tout dans la souplesse de démarrage et d'arrêt d'une centrale.

La palme d'or revient incontestablement à l'hydraulique puisqu'il suffit d'ouvrir ou de fermer une vanne pour démarrer ou arrêter une centrale. Le cycle gaz est lui aussi extrêmement adaptatif. Comme tout moteur à combustion interne, la turbine à gaz peut atteindre sa pleine puissance en seulement quelques dizaines de minutes. Les centrales thermiques classiques sont déjà beaucoup moins flexibles, la montée en puissance demandant d'abord que le cycle de production vapeur soit bien établi. Ainsi une centrale à charbon demandera plusieurs heures pour atteindre sa pleine puissance et une centrale nucléaire jusqu'à deux jours.

Le solaire et l'éolien se caractérisent quant à eux par un manque total de flexibilité puisque les décisions de démarrage ou d'arrêt ne sont plus dans les mains de l'opérateur de la centrale mais dans celles...de Dame Nature. L'électricité ne pouvant être physiquement stockée, pour pallier les intermittences il faut soit s'appuyer sur une énergie d'appoint soit augmenter la puissance disponible en espérant que quand les éoliennes de Lille seront à l'arrêt, celles de Nice tourneront à plein régime.

Comme le montrent les données de la Figure 4, l'efficacité production-puissance d'une centrale nucléaire est trois fois supérieure à celle de l'éolien et six fois supérieure à celle du solaire. Autrement dit, remplacer 1 GW de nucléaire (puissance moyenne d'un réacteur) demandera en moyenne 3 GW d'éolien et 6 GW de solaire. Rame-ner, comme le suppose la loi sur la transition énergétique, la part du nucléaire à 50% en 2025 demanderait donc sur les 8 prochaines années de mettre en œuvre entre 75 GW et 100 GW de renouvelables soit l'équivalent de 30 000 à 40 000 éoliennes classiques dans un parc qui n'en contient

aujourd'hui que 5 000. Rêve ou réalité, les chiffres parlent d'eux-mêmes !

## Conclusion

Les concentrations énergétiques étonnantes que représentent le pétrole, le gaz, le charbon et le nucléaire expliquent en grande partie pourquoi le solaire et l'éolien qui cherchent à capter l'énergie dans l'atmosphère ont tant de mal à rivaliser avec les « énergies du sous-sol ».

Ainsi, à quantité d'électricité équivalente, l'éolien et le solaire demanderont respectivement 670 et 180 fois plus de surface au sol que le pétrole et le gaz. Quant aux biocarburants, leur bilan surfacique est encore plus effrayant puisqu'avec de l'éthanol fabriqué avec de la canne à sucre, le facteur est porté à 12 000. Ce qui est vrai pour l'emprise au sol est aussi vrai pour la consommation d'eau. Un MWh d'éthanol produit à partir de la canne à sucre demande 276 m<sup>3</sup> d'eau.

Quand on sait que la production d'électricité consomme 37,5 % de l'énergie primaire mondiale, le doublement théorique du rendement des procédés permettrait de réduire de près de 20 % la consommation mondiale. Il s'agit donc d'un enjeu majeur de la transition énergétique.

Pour les cycles thermiques, l'amélioration du rendement passe par l'utilisation pertinente de la chaleur fatale via la cogénération ou les cycles combinés. Le rehaussement du mât et l'augmentation de la longueur des pales devrait permettre, d'ici 10 ans, aux éoliennes de multiplier leur puissance par 5. Quant aux cellules photovoltaïques, il faudra rechercher l'adéquation entre le coût, le rendement et la surface au sol.

Si la palme d'or de la flexibilité électrique revient à l'hydraulique, le solaire et l'éolien se caractérisent par un manque total de flexibilité. L'électricité ne pouvant être stockée pour pallier les intermittences, il faut soit s'appuyer sur une énergie d'appoint soit accroître significativement la puissance disponible. Remplacer 1 GW de nucléaire demande ainsi en moyenne de mettre en œuvre 3 GW d'éolien ou 6 GW de solaire. Ramener, comme le suppose la loi sur la transition énergétique, la part du nucléaire à 50 % impliquerait la mise en œuvre de 30 000 à 40 000 éoliennes sur 2 200 km<sup>2</sup> de surface utile ce qui correspond à 22 000 km<sup>2</sup> de surface globale c'est-à-dire environ 4 départements français. Une évidente chimère !