



L'essentiel sur les énergies de stock et les énergies de flux

Ce document rédigé par **Jacques Treiner** analyse les caractéristiques des systèmes énergétiques et clarifie le lexique associé. Il explore d'une part les échelles de temps de l'épuisement des ressources de stock carbonées, d'autre part l'ampleur des fluctuations des deux principales énergies de flux disponibles, l'éolien et le solaire photovoltaïque.

Thème

- Science, climat et société

Partie

- Énergie, choix de développement et futur climatique

Objectifs généraux

- Identifier et comprendre les effets de la science sur les sociétés et sur l'environnement

Savoir-faire

- Utiliser les différentes unités d'énergie employées (tonne équivalent pétrole (tep), kWh...)
- Exploiter des données de production et d'utilisation d'énergie à différentes échelles (mondiale, nationale, individuelle...).
- Comparer quelques ordres de grandeur d'énergie et de puissance : corps humain, objets du quotidien, centrale électrique, flux radiatif solaire...

Résumé

La substitution des énergies carbonées par des énergies non carbonées constitue un défi majeur. Limiter au maximum le changement climatique nécessite de remplacer à une échelle de temps aussi rapide que possible des sources encore disponibles, peu chères mais néfastes, par des sources non émettrices de gaz à effet de serre, mais qui représentent aujourd'hui moins de 20 % de notre énergie primaire. Cette transition requiert d'analyser de façon détaillée les caractéristiques des systèmes énergétiques. Parmi ces caractéristiques, les notions de stock et de flux sont sans doute parmi les plus éclairantes. Les énergies de stock sont pilotables mais épuisables, les énergies de flux sont inépuisables mais leur flux est imposé par la nature. L'ampleur des fluctuations, en l'état actuel des possibilités de stockage de l'énergie, limite leur taux de pénétration dans les réseaux électriques.

Énergies de stock, énergies de flux

Les systèmes énergétiques peuvent être analysés selon divers couples de notions : énergie/puissance, source concentrée/source diluée¹, énergie de stock/énergie de flux, source pilotable/source variable ou intermittente. À cela il convient de rajouter les possibilités de stockage de l'énergie. Dans le présent document, nous nous concentrerons sur le couple **énergie de stock/énergie de flux**. Une précision terminologique : dans la langue courante, les ressources énergétiques sont souvent désignées comme « fossiles » ou « renouvelables ».

Les **sources fossiles** (charbon, pétrole, gaz et uranium) existent en quantité finie sur la planète. Les trois premières ont mis quelques centaines de millions d'années à s'accumuler au sein de la croûte terrestre. L'uranium a été formé par nucléosynthèse au sein d'étoiles massives lors de leur phase terminale sous forme de supernovæ, avant la formation du système solaire. S'agissant de *stocks finis* qui ne se renouvellent pas, ils vont nécessairement s'épuiser, et par conséquent la production de chacun passera, au-delà des fluctuations d'origines diverses, par un maximum – un pic – avant de décroître. Question : *est-il possible d'anticiper le moment où se produiront ces pics de production ?* C'est ce que nous aborderons dans la partie suivante.

Les autres **sources** d'énergie disponibles, dites « **renouvelables** », sont des énergies de *flux* : énergie solaire, éolienne, marine, hydraulique, biomasse, géothermie, toutes ces formes d'énergie sont *inépuisables* (à l'échelle humaine en tout cas), mais leur flux énergétique, c'est-à-dire leur puissance par mètre-carré est imposé par la nature : personne ne commande au soleil, aux vents, aux courants marins, aux précipitations, à la photosynthèse ou à la source d'énergie provenant de l'intérieur de la Terre². Dès lors, l'utilisation de ces sources d'énergie requiert de caractériser ces flux – intensité, régularité – et les possibilités pratiques de les transformer pour nos usages (chaleur, travail, électricité...). Notons que, du point de vue de la physique, le terme « renouvelable » n'est pas très précis : alors qu'il correspond bien à une biomasse que l'on renouvelle par une activité agricole, dès lors que l'on cherche à produire de l'électricité, il est nécessaire d'utiliser des matériaux qui, eux, constituent des stocks finis (non renouvelables). Or, comme on le verra plus loin, les énergies de flux étant diluées, la quantité de matériaux nécessaire pour produire 1 kWh est significativement plus grande qu'avec les énergies de stocks.

L'utilisation des énergies de stock et des énergies de flux pose des questions différentes. Pour les premières, il est important d'anticiper leur épuisement. Quant aux secondes, puisque nous ne contrôlons pas leur flux, la ressource peut exister lorsqu'on n'en a pas besoin, ou manquer lorsque le besoin est là. Leur utilisation optimale dépend alors des possibilités de lisser les fluctuations de la production pour l'adapter aux usages, voire d'adapter les usages aux fluctuations de la production. Il convient alors de s'assurer que l'on dispose des sources pilotables permettant de gérer ces fluctuations, compte tenu de ce que l'on ne sait pas, aujourd'hui, stocker de grandes quantités d'énergie.

1. La notion de concentration renvoie à la quantité de matière qu'il faut transformer pour mettre en jeu une quantité donnée d'énergie.

2. Seul le flux d'énergie tiré de la biomasse dépend de l'activité humaine : nous n'avons certes pas le moyen de contrôler le rythme de la photosynthèse des plantes, mais nous avons les moyens de déforester ou de planter.

État des lieux de la consommation mondiale d'énergie primaire

La figure 1 montre ce qu'il en est depuis le **début du 20^e siècle**, à l'époque où le charbon était la principale source d'énergie. Depuis, d'autres ressources énergétiques ont été mises en œuvre, avec une caractéristique invariable : on n'observe jamais de substitution d'une source à une autre, chaque nouvelle source vient s'ajouter aux autres déjà présentes, sans s'y substituer. Ainsi, depuis la Seconde Guerre mondiale, les sources carbonées, charbon, pétrole et gaz, constituent plus de 80 % de l'énergie primaire consommée mondialement. En 2020, selon l'agence internationale de l'énergie (AIE), la répartition par secteur de cette consommation est la suivante : **industrie 30 %, transports 26 %, résidentiel 22 %, tertiaire 8 %, agriculture et pêche 2 %, usages non énergétiques (chimie, etc.) 10 %**.

Pour autant, comme nous l'avons dit plus haut, les choses vont changer au cours du 21^e siècle, que ce soit par la mise en place de politiques climatiques de sortie des sources d'énergie carbonées, ou par épuisement géologique de ces ressources. D'où l'importance de tenter d'évaluer la position des pics de production attendus.

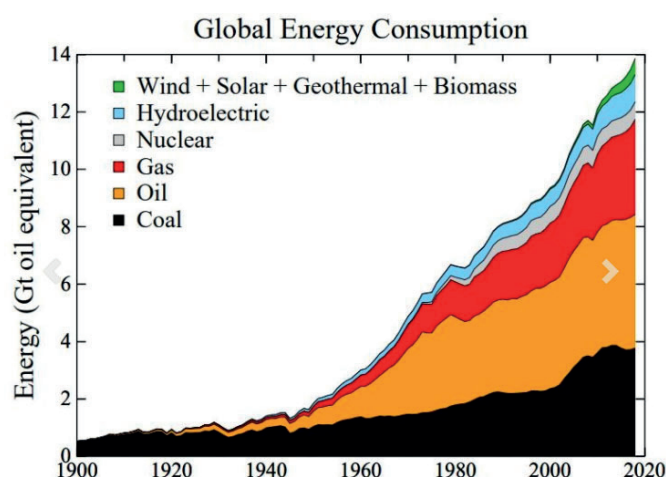


Figure 1. Consommation mondiale d'énergie primaire, exprimée en milliard de tonne équivalent pétrole.

Source : site de [l'université de Columbia](#)

3. Rappelons qu'on désigne par « énergie primaire » celle qui est associée aux transformations de ressources prélevées dans l'environnement (combustibles fossiles, uranium, rayonnement solaire, etc.). On appelle « énergie finale » celle qui est mise à disposition des consommateurs (essence, gaz de ville, électricité, etc.).

Énergie de stock

Anticiper les pics de production des ressources fossiles

Le géologue Marion K. Hubbert a proposé en 1956 un modèle simple⁴ pour calculer la courbe de production d'une ressource épuisable⁵, voir Encadré 1. À l'époque, il s'agissait d'anticiper à quelle échelle de temps la production américaine de pétrole passerait par un maximum avant de décliner. Hubbert anticipa ainsi un pic de production au début des années 1970.

Encadré 1

La modélisation de Hubbert

On désigne par P la production annuelle, Q la production cumulée jusqu'à l'année en cours et Q_{\max} la quantité totale extractible, incluant ce qui a déjà été consommé. Le modèle fait l'hypothèse que P (qui représente la dérivée discrétisée de Q) et Q sont reliées par la relation :

$$P = \alpha Q(1 - Q/Q_{\max})$$

Lorsque Q est petit devant Q_{\max} (début de l'extraction d'une ressource), la relation $P = \alpha Q$ conduit à une évolution exponentielle. Il n'y a aucune contrainte sur la ressource et les gisements les plus faciles à exploiter sont utilisés. À l'autre extrême, lorsque Q tend vers Q_{\max} , P tend (exponentiellement) vers 0. P passe donc par une valeur maximale qui correspond à un pic de production. Dans le modèle, la valeur de α doit être ajustée empiriquement sur la base des productions passées. La version continue de l'équation ci-dessus est l'équation de Verhulst, introduite vers 1840 dans un contexte de dynamique de population. Sa solution est analytique. On peut ainsi montrer que la position du pic dépend peu de Q_{\max} .

Il est facile de programmer sur un tableur une version discrétisée du modèle.

Les années sont repérées par un entier n . On désigne par $P(n)$ la production de l'année n , et par $Q(n)$ la quantité extraite dans le passé jusqu'à l'année n . La relation entre P et Q permet d'écrire :

$$P(n+1) = \alpha Q(n) (1 - Q(n)/Q_{\max})$$

La quantité extraite jusqu'à l'année $n+1$ est égale à ce que l'on avait extrait à l'année n plus ce qui a été extrait à l'année $n+1$, soit :

$$Q(n+1) = Q(n) + P(n+1)$$

Il suffit à présent d'amorcer la récurrence en choisissant deux années consécutives, notées 0 et 1, pour lesquelles on connaît $Q(0)$ et $P(1)$, d'où la valeur de α à partir de la relation entre P et Q .

Le modèle suppose de connaître ce qui se trouve dans le sol. Les spécialistes distinguent les *ressources* et les *réserves*. Les ressources sont constituées de tout ce que contient la croûte terrestre, les réserves (Q_{\max} dans l'encadré) sont constituées de ce que l'on pense pouvoir extraire de façon économiquement rentable, compte tenu de la technologie existante et de l'état du marché⁶. Du coup, plusieurs facteurs

4. La méthode est présentée dans l'article *Jouer avec les chiffres du climat*, Reflets de la physique n°43, page 46.

5. Il anticipait, pour les États-Unis, un pic de production du pétrole pour le début des années 1970 – qui fut confirmé empiriquement.

6. Les réserves exploitables sont elles-mêmes répertoriées en « prouvées » (dont on estime la probabilité d'extraction à 90%), « probables » (probabilité de 50%), et possibles (probabilité de 10%).

peuvent faire évoluer la valeur de Q_{\max} au cours du temps. D'une part, la découverte de nouveaux gisements. D'autre part, lorsqu'un gisement est découvert, il se peut que l'évaluation de ce qu'il sera possible d'en extraire de façon rentable évolue, grâce aux progrès de la technologie. À ces facteurs s'en ajoute un dernier, géopolitique celui-là. Une entreprise ou un état exploitant une ressource est en général réticent à annoncer un épuisement de cette ressource, ne serait-ce que parce que la valeur des actifs s'y rapportant dépend en partie de la déclaration des réserves estimées. Mais la position du pic de production dépend faiblement de la valeur de Q_{\max} : une variation de 25 % ne déplace le pic que de quelques années, comme on peut le vérifier à partir du modèle.

Les réserves exploitables sont estimées à 650 Gtep de charbon, 490 Gtep de pétrole et 330 Gtep de gaz.

Les résultats du modèle sont présentés figure 2 (notons que l'on n'envisage ici aucune politique de réduction volontaire de la consommation en vue de limiter les émissions de gaz à effet de serre). L'analyse de la consommation mondiale du charbon montre une brusque accélération à partir des années 2000, entièrement due à la forte dynamique économique chinoise. Celle-ci a donc été traitée ici séparément du reste du monde, avec une valeur des réserves de 85 Gtep. C'est ce qui donne la structure en double pic, l'un, vers 2030, caractérisant la Chine, et l'autre, plus étalé, advenant au cours du siècle prochain, pour le reste du monde.

Le résultat le plus frappant tient à ce que les pics de production se trouvent tous *dans le siècle*, ce qui donne ensuite une forte décroissance des ressources énergétiques fossiles. Il faut noter cependant que le calcul de l'évolution *après* le pic mondial est sans doute moins fiable qu'*avant* le pic. En effet, passé le pic, on entre dans une période de tensions économiques, voire d'instabilités, puisqu'on peut penser que la demande d'énergie est toujours là, alors que la production est de plus en plus difficile à assurer : cela ne peut que déstabiliser les processus de production des biens et des services. Compte tenu du lien entre le produit intérieur brut (PIB) et la disponibilité en énergie, un tel resserrement de l'approvisionnement en ressources énergétiques fossiles conduirait à un resserrement du PIB mondial dans des proportions analogues, à moins que d'autres ressources énergétiques puissent être mises en place en substitution.

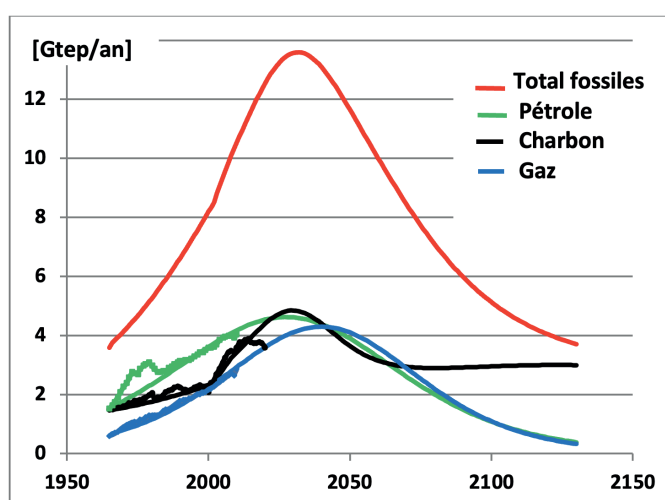


Figure 2. Données empiriques de consommation des combustibles fossiles (courbes fluctuantes) et résultats du modèle de Hubbert (courbes lisses).

Prise en compte du pétrole non conventionnel

Le modèle de Hubbert fait l'hypothèse d'une homogénéité mondiale de l'utilisation des ressources. Cette hypothèse est acceptable pour le pétrole et le gaz dits *conventionnels*, ceux qui sont extraits par exemple des grands gisements du Moyen-Orient. Mais l'apparition du *pétrole et du gaz de roche-mère* exige de les traiter comme des ressources nouvelles, tant les conditions physiques et économiques sont différentes du pétrole et du gaz conventionnels.

Ces hydrocarbures sont contenus dans des pores de quelques dizaines de nanomètres, dont ils sont expulsés par fracturation hydraulique, injection de tensio-actifs divers et de sable pour maintenir ouvert le réseau de fissures ainsi créé. Quelques pourcents seulement des hydrocarbures présents sont récupérés (alors que la proportion est supérieure à 30 % pour les puits conventionnels), et la production d'une installation s'épuise au bout de deux ou trois ans. La croissance observée aux USA requiert donc la mise en service de milliers de puits nouveaux chaque année, chaque puits ne demandant qu'un faible investissement. La rentabilité de l'exploitation du pétrole de roche-mère est par conséquent très sensible aux conditions du marché et aux progrès techniques. Pour le moment, cette rentabilité n'est pas assurée, et semble différée pour les jours où le prix du baril aura fortement augmenté. Rappelons que les États-Unis sont le seul pays où la technologie est largement utilisée. En France, la fracturation hydraulique a été interdite par la loi Jacob de 2011.

Le chiffre de 7 millions de barils par jour atteint en 2019 correspond à une production de 0,3 Gtep/an, chiffre qu'il faut comparer à la production mondiale de pétrole conventionnel de 4,44 Gtep en 2017. La problématique de la ressource peut donc se résumer ainsi : *la progression du pétrole de roche-mère va-t-elle parvenir à compenser le déclin mondial du pétrole conventionnel ?*

Si l'on rajoute les autres ressources pétrolières non conventionnelles, on obtient les projections de la figure 3.

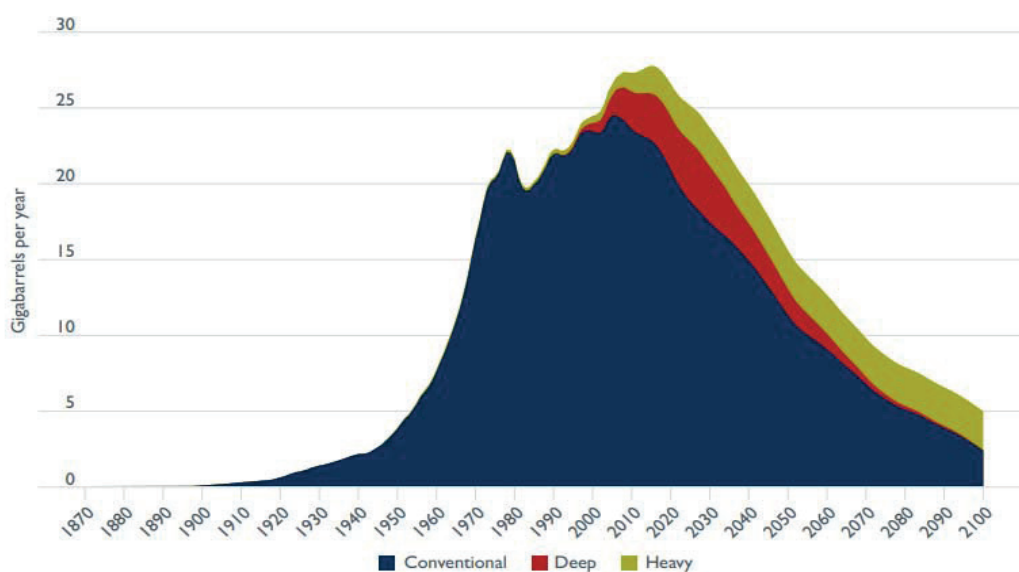


Figure 3. Projections de la production pétrolière mondiale, hors pétrole de roche-mère. 5 Gbl = 0,6 Gtep.

Deep : gisements off-shore profonds. Heavy : huiles lourdes, nécessitant des techniques spécifiques d'extraction.

Source : *Bureau of Infrastructures, Transport and Regional Economics, Australian Government, 2017.*

On constate que le modèle de Hubbert, malgré sa simplicité extrême, fournit tout de même un bon outil pour la réflexion.

Énergie nucléaire⁷

Les réacteurs actuels utilisent comme mécanisme de base la fission de l'uranium-235. Or celui-ci ne constitue que 0,7 % du minerai naturel, le reste étant constitué d'uranium-238. Les réserves actuelles permettent de faire fonctionner la totalité de ces réacteurs pendant quelques dizaines d'années, un siècle au maximum⁸. Dans les réacteurs dits de 4^e génération, la totalité du minerai est utilisée, et le problème de l'épuisement de la ressource ne se pose alors qu'à l'échelle du millier d'années. Mais il s'agit d'une technologie différente, dite « à neutrons rapides », aujourd'hui peu développée, principalement en Russie et en Corée du Sud.

Retenons de ce qui précède que dès la seconde moitié du siècle, l'humanité devra avoir trouvé des sources énergétiques alternatives aux hydrocarbures pour assurer son développement, et entamé des approches de sobriété énergétique. À fortiori si des politiques climatiques conduisent à ne pas exploiter toutes les ressources fossiles disponibles, à commencer par la plus émettrice de gaz à effet de serre, le charbon.

Énergies de flux : focus sur l'éolien et le solaire photovoltaïque.

Les énergies de flux recouvrent des réalités très diverses : d'une part, des sources d'énergie inépuisables (à l'échelle humaine en tout cas) : géothermie, énergies des courants marins, rayonnement solaire, énergie du vent, énergie associée à la biomasse naturelle, énergie potentielle des eaux des barrages, énergie cinétique des eaux de rivière ; d'autre part l'énergie associée à la production agricole, qui est renouvelable, au sens où on peut agir, donc dépenser de l'énergie, pour la renouveler.

Notons que la mise en œuvre de ces ressources nécessite des matériaux qui, eux, ne sont ni inépuisables ni renouvelables : béton, cuivre, aimants, panneaux solaires, matières plastiques, etc., autant de matières qui constituent des stocks finis. Nous ne montrerons ici qu'une figure donnant quelques ordres de grandeur.

7. Se reporter à la ressource en ligne « [L'essentiel sur l'énergie nucléaire](#) ».

8. À moins de prendre en compte l'uranium contenu dans l'eau de mer et le flux annuel d'uranium apporté par les rivières, estimé à 0,24 microgramme par litre.

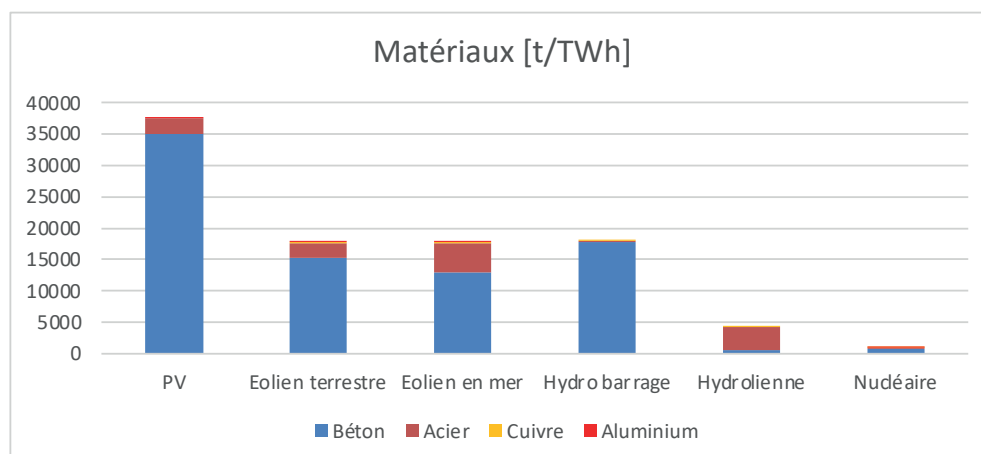


Figure 4 : Matériaux nécessaires à la production d'électricité (en tonnes/TWh). Durées de vie des installations : 25 ans pour le solaire photovoltaïque (PV) et l'éolien, 150 ans pour les barrages, 20 ans pour les hydroliennes, 60 ans pour le nucléaire.

Source : ADEME, *Projet SURFER*, novembre 2020

Dans la suite de ce paragraphe, nous nous concentrerons sur les énergies de flux électrogènes dont le développement est le plus rapide à l'échelle mondiale, le solaire photovoltaïque (PV) et l'éolien.

Le plus souvent, le développement de ces filières est caractérisé par la puissance installée (cas de l'éolien), ou la puissance-crête (cas du PV). Il s'agit à chaque fois de la puissance maximale que l'installation peut fournir, soit dans les meilleures conditions de vent, soit dans les meilleures conditions d'ensoleillement. Comme ces conditions ne sont pas toujours réunies, on considère la *puissance moyenne* annuelle : c'est l'énergie totale produite en une année divisée par le nombre de secondes dans une année. On désigne par *facteur de charge* annuel le rapport de la puissance moyenne à la puissance installée. Une troisième notion de puissance doit également être introduite, la puissance instantanée, c'est-à-dire la puissance moyenne fournie pendant un bref intervalle de temps – disons un quart d'heure. Pour prendre une analogie familière, pour caractériser la disponibilité en eau, il ne suffit pas de connaître la taille du réservoir, il faut encore donner celle du robinet. Le [site du réseau de transport de l'électricité](#) (RTE) permet de suivre en temps réel les contributions des différentes sources à la puissance instantanée appelée sur le réseau.

En France, le facteur de charge éolien est, selon RTE, de 22 %, et celui du solaire photovoltaïque de 13 % (moins de 11 % au nord, 16 % au sud). Mais qu'en est-il des puissances instantanées ? La question est importante, car un réseau électrique ne peut fonctionner qu'en assurant à chaque instant et en tout lieu l'égalité entre offre et demande d'électricité. Il convient donc de caractériser les fluctuations des productions éoliennes et solaires.

Pour le solaire PV, la réponse est simple : la production a lieu pendant quelques heures de la journée. Comme le facteur de charge du PV est de 0,13, le nombre journalier d'heures-équivalent à pleine puissance est, en moyenne, d'environ 3,12 (car $3,12/24 = 0,13$), que nous approximerons à 3 heures. La puissance-crête est donc de l'ordre de 8 fois supérieure à la puissance moyenne. Cette caractéristique vaut pour toute l'Europe, puisqu'il fait jour (et nuit) partout en même temps. De plus, viennent se rajouter des variations saisonnières : sous nos latitudes, la puissance moyenne est quatre fois plus faible en hiver qu'en été (un facteur 2 pour l'énergie solaire reçue et un autre facteur deux pour la durée du jour⁹).

9. Les pays du sud bénéficient de conditions bien plus favorables : l'écart été/hiver se réduit avec la latitude jusqu'à pratiquement s'annuler dans la zone intertropicale.

Pour l'éolien, en revanche, on pourrait penser que s'opère un lissage européen des fluctuations, selon l'idée de bon sens : « *il y a toujours du vent quelque part* ». En réalité, cet effet de « foisonnement » (terme consacré) existe, mais il est faible. C'est ce que montre la figure 5, où est reportée la production journalière du parc éolien européen au cours des trois dernières années. Au cours de la période, la puissance installée est passée de 175 GW à 220 GW. On voit que les fluctuations peuvent atteindre 1500 GWh en quelques jours, soit une variation de puissance de plus de 60 GW, ou 30 % de la puissance éolienne installée. Le minimum de 300 GWh en une journée correspond à 5 % de la puissance installée, le maximum de 2500 GWh à 52 % de la puissance installée. En réduisant le pas de temps, on constate que la puissance instantanée varie entre quelques pourcents et 60-70 % de la puissance installée¹⁰.

Production européenne journalière [GWh] du parc éolien des 4 dernières années :

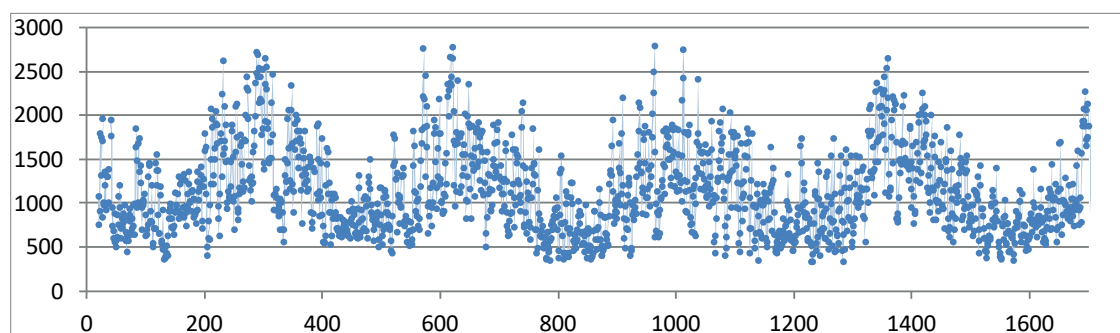


Figure 5 : Production du parc éolien européen total, en GWh. Chaque point représente l'énergie journalière produite. Premier point à gauche : 11/10/2023, on remonte le temps vers la droite. Puissance installée totale fin 2018 (premiers points à droite) : 175 GW. Puissance installée en octobre 2023 : environ 220 GW. La valeur moyenne journalière sur la période récente est d'environ 1200 GWh, comparée au potentiel maximal de $220 \times 8760 / 365 = 5280$ GWh, soit un facteur de charge global de 0,23. On notera la forte modulation été/hiver.

Source : [site Windflix](#)

Le fait que l'idée « de bon sens » ne soit pas confirmée par les données ne doit pas surprendre, car chacun peut constater lors d'un bulletin météo que les structures atmosphériques européennes s'étendent sur des milliers de kilomètres. Par conséquent, pour le dire de façon ramassée, le plus souvent¹¹, lorsqu'il y a du vent quelque part, il y en a partout, et lorsqu'il n'y a pas de vent quelque part, c'est qu'il n'y en a nulle part.

Ces données montrent aussi pourquoi le déploiement de l'énergie éolienne produit structurellement des moments de sous-production et des moments de surproduction. Imaginons qu'un réseau ait besoin en moyenne de 100 GW. Compte tenu du facteur de charge de 0,23, il faudra installer 435 GW. Le minimum de puissance instantanée sera donc de 22 GW (5 % de la puissance installée), soit un déficit de 78 GW, et le maximum d'environ 226 GW (52 % de la puissance installée), soit un excédent de 126 GW. Les manques peuvent être comblés par une réserve de puissance faisant appel à une source pilotable, mais que faire de l'excédent ? L'exporter chez le voisin nécessiterait le développement massif d'interconnexions, lesquelles risquent de toute façon d'être inopérantes si le voisin a également développé une grande puissance éolienne : il aura lui aussi besoin d'exporter au même moment.

10. Ces données confirment l'étude de H. Flocard, J.P.Pervès et J.P.Hulot publiée dans Techniques de l'ingénieur, TI 8586.

11. Car la France, par exemple, dispose de 2 régimes de vents régionaux : la vallée du Rhône et le Pays basque.

Fluctuations de la demande, fluctuations de la production.

Au cours d'une journée, les fluctuations de la demande d'électricité sont de l'ordre de 15 % de la puissance moyenne appelée. La figure 6 montre ce qu'il en est pour la France lors d'une semaine d'hiver. On voit que les pics de la demande, vers 8h et vers 19h, sont gérés principalement par l'hydroélectricité, secondairement par le gaz.

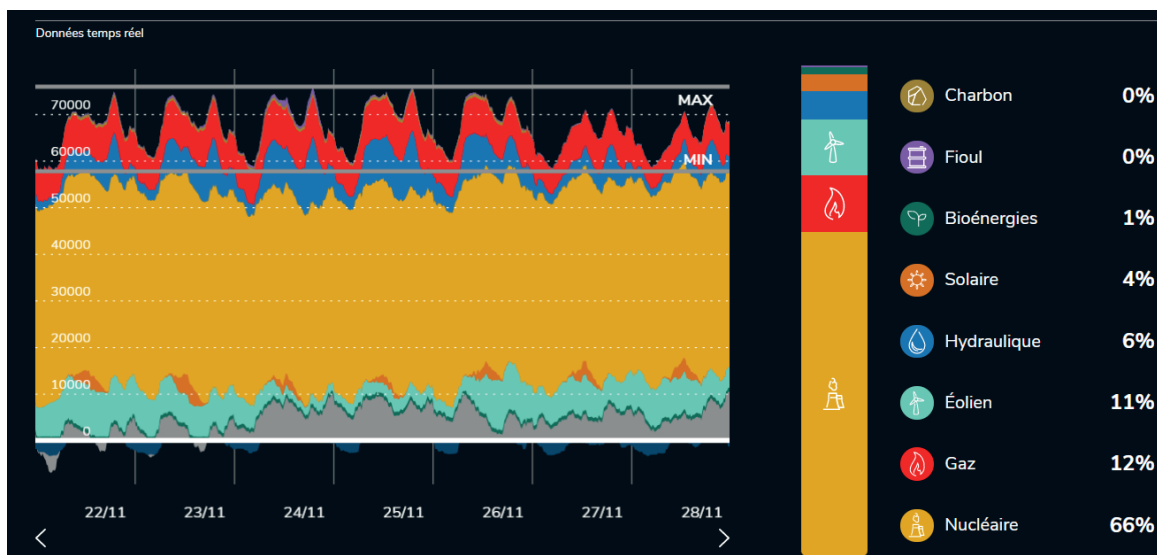


Figure 6. Consommation d'électricité en France pendant la semaine du 22/11/2021 au 28/11/2021.

Source : [site RTE](#)

Pour comparaison, la figure 7 montre la consommation d'électricité en Allemagne pendant une semaine d'hiver, ainsi que la décomposition par filière de production. On constate que les fluctuations de l'éolien constituent une fraction importante de la puissance installée (environ 50 GW), et que ces fluctuations sont gérées par la puissance pilotable en charbon, lignite et gaz.

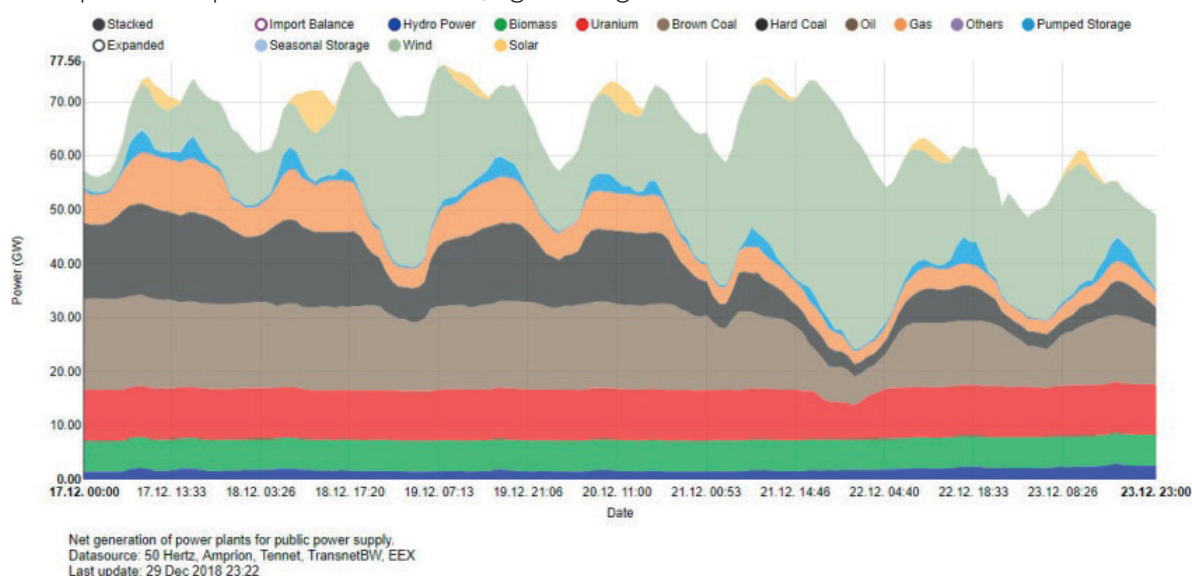


Figure 7. Consommation d'électricité en Allemagne pendant une semaine d'hiver. Noter, en début de la semaine considérée, que les sources pilotables (y compris la biomasse) fournissent l'essentiel de la puissance appelée.

On peut ainsi comprendre que l'Allemagne, qui a installé environ 120 GW d'éolien et de solaire PV, a dû conserver sa puissance pilotable en énergies fossiles (cf. figure 8), la diminution du charbon étant compensée par la montée du gaz. Un kWh produit avec le mix allemand émet environ 10 fois plus de CO₂ qu'avec le mix français : on consultera sur ce point le site [Electricity Maps](https://www.electricitymaps.com/), où l'on trouve, en temps réel, les émissions de CO₂ associées à la production d'un kWh d'électricité, pays par pays.

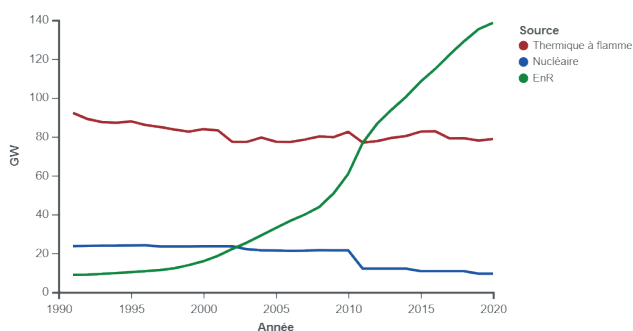


Figure 8 : Évolution des puissances électriques installées en Allemagne. On note que la puissance installée en centrales thermiques n'a pas diminué depuis plus de 20 ans, malgré la forte progression de la production d'énergies renouvelables (EnR).

Conclusion

Nous avons analysé deux caractéristiques essentielles des systèmes énergétiques, les énergies de stock et les énergies de flux (souvent dénommées renouvelables). Le modèle de Hubbert appliqué aux ressources de stocks carbonées indique un fort déficit potentiel dans la seconde moitié du siècle, ne permettant pas un fonctionnement à l'identique de nos sociétés, et ceci en l'absence de toute politique climatique. Explorer comment ce déficit peut être comblé par des sources décarbonées, et/ou par une vigoureuse sobriété énergétique est delà du but de cet article.

Notre analyse conduit à différencier l'énergie produite, selon qu'elle provient d'un système pilotable ou intermittent. Dans le cas d'un réseau majoritairement pilotable, il faut gérer les fluctuations de la demande, qui sont relativement modérées. Dans le cas d'un réseau à forte pénétration de sources intermittentes, il faut gérer les fluctuations de la production, qui sont largement supérieures à celles de la demande. Du point de vue de la stabilité des réseaux électriques, un kWh aléatoire n'est pas équivalent à un kWh garanti. Aujourd'hui, c'est l'impossibilité de stocker de grandes quantités d'énergie qui limite la pénétration des sources électrogènes variables ou intermittentes dans les réseaux électriques.

Jacques Treiner
Octobre 2023