

# Énergies de stock, énergies de flux

par Jacques TREINER

Laboratoire interdisciplinaire des énergies de demain (LIED/PIERI)

Université Paris-Diderot - 75013 Paris

[jtreiner@orange.fr](mailto:jtreiner@orange.fr)

**P**ARMI LES DIFFÉRENTES CARACTÉRISTIQUES des systèmes énergétiques, les notions de stock et de flux sont sans doute parmi les plus éclairantes. Le développement de l'humanité repose en grande majorité sur l'utilisation d'énergies de stock – les combustibles fossiles et le nucléaire – et la contrainte climatique requiert de les remplacer à brève échelle de temps par des énergies non carbonées – renouvelables et nucléaires. Les énergies de stock sont épuisables et pilotables, les énergies de flux sont inépuisables, mais leur flux est imposé par la nature. Dans cet article, on explore les échelles de temps de l'épuisement des ressources fossiles et l'on évalue l'ampleur des fluctuations des deux principales énergies renouvelables, l'éolien et le solaire. L'ampleur de ces fluctuations, en l'état actuel des connaissances concernant le stockage de l'énergie, limite leur taux de pénétration dans les réseaux électriques.

## INTRODUCTION

L'Accord de Paris de 2015 a marqué une étape dans les négociations internationales concernant le climat : l'ensemble des États signataires a pris acte des effets des émissions de gaz à effet de serre (GES) sur le climat de la planète, et chacun a défini des engagements à réduire ses propres émissions, avec un horizon temporel fixé à 2030<sup>(1)</sup>. Le préambule de l'Accord, dans son point 17, insiste bien sur le fait que ces engagements (les « Contributions déterminées à l'échelle nationale ») ne placent pas le monde sur une trajectoire permettant de contenir le réchauffement climatique en dessous de 2 °C, *a fortiori* de 1,5 °C. Il n'empêche que le centre de gravité des préoccupations s'est déplacé vers les scénarios de transition énergétique pour des économies décarbonées. Aujourd'hui, 80 % de l'énergie primaire consommée par l'humanité est d'origine fossile (charbon, pétrole, gaz), et la sortie du carbone représente un défi jamais rencontré dans le passé : lorsqu'une nouvelle source d'énergie était découverte, elle venait se rajouter à celles déjà utilisées auparavant, alors qu'il s'agit aujourd'hui de substituer certaines sources, disponibles, mais néfastes, par d'autres sources peu ou pas émettrices de GES (Énergies renouvelables et énergie nucléaire).

(1) Les déclarations de Donald Trump ont certes une importance pratique, mais elles ne remettent pas en cause le consensus global, d'autant que le retrait effectif des USA ne peut avoir lieu avant la prochaine mandature américaine...

En conséquence, les « scénaristes » ne manquent pas : entreprises de l'énergie, agences gouvernementales, organisations non gouvernementales, associations, autant d'instances qui, par nature ou par conviction, produisent des scénarios. Mais comme il ne s'agit pas d'une discipline académique, où les publications doivent se conformer à un certain nombre de règles (faire l'état de la discipline, montrer l'originalité de son travail, exposer clairement les hypothèses choisies...) et passer par des protocoles de relecture et d'évaluation par les pairs, les scénarios énergétiques sont difficiles à lire : leurs hypothèses ne sont pas toujours explicitées, la nature de certains choix n'est pas donnée (technique ? idéologique ?), de sorte qu'ils sont difficiles à comparer.

Parmi les outils permettant de se repérer dans cette complexité, le rappel de quelques caractéristiques essentielles des systèmes énergétiques peut s'avérer utile. Parmi les notions-clé, citons les couples énergie/puissance, énergie concentrée/énergie diluée, énergie de stock/énergie de flux, énergie pilotable/énergie intermittente, et stockage de l'énergie. Dans le présent article, je me concentrerai sur les notions d'énergies de stock et d'énergies de flux, dont on va voir qu'elles fournissent des outils de compréhension indispensables.

## 1. STOCKS ET FLUX

Charbon, pétrole, gaz et uranium existent en quantité finie sur la Terre. Les trois premiers ont mis quelques centaines de millions d'années à s'accumuler au sein de la croûte terrestre. L'uranium fait partie de la matière première dont est fait le système solaire, il a été formé par nucléosynthèse au sein d'étoiles massives lors de leur phase terminale sous forme de supernovae. Dans tous les cas, le stock de ces matières premières peut être considéré comme fixe. S'agissant de stocks finis qui ne se renouvellent pas, ils vont nécessairement s'épuiser, et par conséquent tendanciellement, 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 ? Cela suppose d'avoir une bonne évaluation des réserves exploitables, et un modèle de consommation de ces réserves. Nous y reviendrons plus bas. Notons également que les énergies de stock sont très concentrées : la combustion d'un litre d'essence produit 10 kWh de chaleur, l'énergie nucléaire est des millions de fois plus concentrée<sup>(2)</sup>.

Les autres sources d'énergie dont nous disposons sont des énergies de flux : énergie solaire, énergie éolienne, énergie marine, énergie hydraulique, biomasse, géothermie, toutes ces formes d'énergie sont inépuisables (à l'échelle humaine en tout cas),

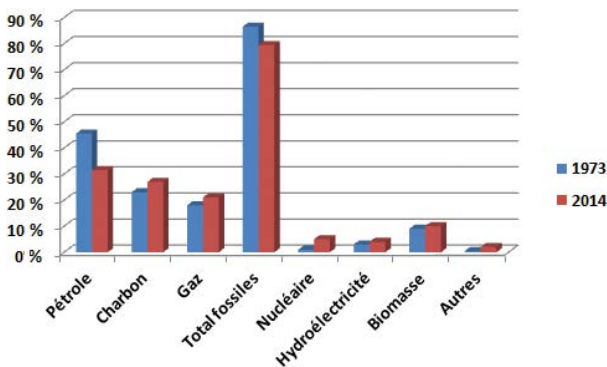
---

(2) L'unité d'énergie associée aux transformations chimiques est l'électron-volt (eV) ; pour une transformation nucléaire, c'est le méga électron-volt (MeV).

mais leur flux, c'est-à-dire la quantité d'énergie disponible chaque année – et même à chaque instant – est imposée par la nature. Personne ne commande au Soleil, aux vents, aux courants marins, aux précipitations, à la photosynthèse ou au flux d'énergie provenant du centre de la Terre<sup>(3)</sup>. Dès lors, l'utilisation de ces sources d'énergie requiert de connaître les caractéristiques de ces flux – intenses ou pas, réguliers ou pas – et les possibilités pratiques de les transformer pour nos usages (chaleur, travail, électricité...).

On voit que l'usage des énergies de stock et celui des énergies de flux posent des questions de différente nature. Pour les premières, nous disposons d'une certaine latitude pour piloter leur flux – il suffit d'extraire plus de matière première –, mais il est important d'anticiper leur épuisement. Les secondes sont inépuisables, mais comme nous ne contrôlons pas leur flux, la ressource peut exister lorsqu'on n'en a pas besoin, alors qu'elle peut manquer quand le besoin est là (typiquement : le Soleil ne brille pas la nuit). 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, soit en mobilisant des sources pilotables capables de s'adapter à ces fluctuations, soit en modifiant les usages, soit en stockant l'énergie.

Pour mémoire, il est bon d'avoir à l'esprit la structure de la consommation d'énergie primaire mondiale. La figure 1 résume l'évolution de la situation entre 1973 et 2014. La consommation s'élève aujourd'hui à environ 13 Gtep<sup>(4)</sup>, pour une population



**Figure 1** - Pourcentage des différentes sources d'énergie dans la consommation totale mondiale d'énergie primaire. La part des énergies fossiles a un peu diminué en quarante ans, mais elle se situe encore autour de 80 %.

- (3) Seul le flux d'énergie tiré de la biomasse est sensible à l'activité humaine : nous n'avons certes pas moyen de contrôler le rythme de la photosynthèse des plantes, mais nous avons les moyens de déforester ou de planter.
- (4) La tonne-équivalent pétrole (tep) représente l'énergie produite lors de la combustion d'une tonne de pétrole. Comme tous les pétroles n'ont pas le même pouvoir calorifique, il a fallu choisir une convention : 1 tep = 42 GJ (GJ = milliards de joules).

de 7,5 milliards d'individus. Les ressources fossiles contribuent toujours à environ 80 % de notre consommation. La rubrique «Autres» contient toutes les sources renouvelables autres que la biomasse et l'hydroélectricité. Bien que leur développement soit très rapide, avec des taux de croissance à deux chiffres, leur contribution totale demeure inférieure à 2 %.

### Comment évaluer les pics de production des ressources fossiles<sup>(5)</sup> ?

Marion King Hubbert, un géologue américain, proposa en 1956 une méthode qui s'avéra particulièrement précise : il anticipa seize ans à l'avance que le pic de production pétrolière aux USA se produirait en 1972-1973. La méthode est facilement utilisable avec un tableur. Soit  $P$  la production annuelle et  $Q$  la production cumulée passée.  $P$  est donc la dérivée de  $Q$ . On fait l'hypothèse qu'au début de l'exploitation,  $P$  est proportionnel à  $Q$ . L'idée est que l'exploitation d'une ressource d'énergie permet un développement technologique conduisant à accroître l'exploitation de la ressource. On écrit donc :

$$P = \alpha Q.$$

Mais comme il s'agit d'une ressource épuisable, lorsque  $Q$  approche la totalité de la ressource exploitable  $Q_{\max}$ ,  $P$  doit s'annuler. L'expression la plus simple satisfaisant les deux conditions aux limites est l'équation logistique :

$$P = \alpha Q \left( 1 - \frac{Q}{Q_{\max}} \right).$$

La valeur de  $Q_{\max}$  est fournie par les géologues, et  $\alpha$  est déterminé par ajustement sur une année de référence prise comme année 0 :

$$\alpha = \frac{P(0)}{\left[ Q(0) \frac{1 - Q(0)}{Q_{\max}} \right]}.$$

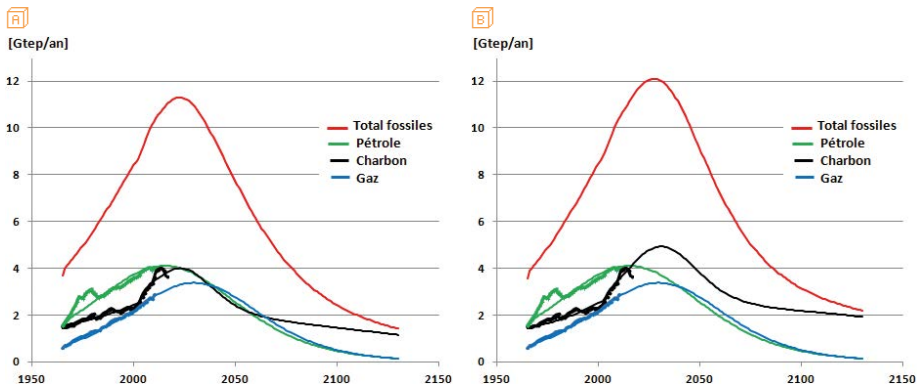
Ensuite, on itère les relations qui permettent de passer de l'année  $n-1$  à l'année  $n$  :

$$P(n) = \alpha Q(n-1) \frac{1 - Q(n-1)}{Q_{\max}},$$

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

La figure 2 montre les résultats obtenus pour le charbon, le pétrole et le gaz. L'année de référence est 1965, et les valeurs prises pour  $Q_{\max}$  sont respectivement 400 Gtep pour le pétrole et 300 Gtep pour le gaz. Pour évaluer l'effet des incertitudes concernant les réserves de charbon sur la position du pic mondial de la production de combustibles fossiles, deux valeurs ont été prises : 600 Gtep (cf. figure 2A) et 800 Gtep (cf. figure 2B).

(5) La méthode a déjà été présentée dans un article consacré aux émissions de gaz à effet de serre [1].



**Figure 2** - Projection de la production mondiale des énergies fossiles selon le modèle d'Hubbert. Les réserves pour le pétrole et le gaz sont respectivement 400 et 300 Gtep. Pour le charbon, 600 Gtep à gauche, et 800 Gtep à droite. La consommation chinoise a été traitée séparément du reste du monde (100 Gtep à gauche, 150 Gtep à droite). Ceci est justifié par le fait que l'analyse des données montre que le changement de pente initié en 2000 est entièrement dû à la consommation chinoise.

On voit que pour les valeurs choisies des réserves exploitables, le pic du pétrole conventionnel est déjà passé, celui du gaz et du charbon se situe vers 2030, ce qui donne un pic de l'ensemble des fossiles vers 2030, après quoi la production annuelle se raccorde au bout de quelques décennies à celle du charbon, qui demeure la seule ressource fossile disponible au-delà du *xxi*<sup>e</sup> siècle. Passer de 600 à 800 Gtep pour le charbon modifie très peu cette structure. Ces courbes supposent évidemment qu'aucune politique climatique visant à réduire la consommation des fossiles n'est mise en place<sup>(6)</sup>.

Les réserves exploitables sont parfois, voire souvent, exprimées en termes de « nombre d'années à production constante ». La modélisation montre en quoi cette façon de présenter les choses est trompeuse. D'une part, le taux d'exploitation *n'est pas* constant, et d'autre part, ce qui compte du point de vue économique c'est la *position du pic*, et non le moment où la dernière goutte de pétrole ou le dernier morceau de charbon sera extrait du sol. En effet, le passage du pic signale l'entrée dans une zone d'instabilité économique, puisque la demande n'a pas de raison de diminuer alors que l'offre stagne puis diminue.

(6) À ce sujet, on note que la production du charbon présente un pic en 2013, dû à une réduction de la production chinoise dans les années qui ont suivi. Il peut s'agir de l'effet d'un ralentissement passager de l'activité économique du pays combiné au choix de remplacer en partie le charbon par le gaz, moins polluant. L'objectif est de faire passer la part du gaz dans la consommation d'énergie primaire de 4 % en 2011, à 8 % en 2015 et 20 % en 2020. Les importations de gaz, inexistantes avant 2010, ont fortement augmenté depuis 2010 (quatrième importateur mondial aujourd'hui).

Un mot sur les perspectives de l'énergie nucléaire. 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 ces réacteurs pendant quelques dizaines d'années, un siècle au maximum. Dans les réacteurs dits de quatrième génération, la totalité du minerai est utilisée, ce qui multiplie les réserves par le rapport  $100/0,7$ , soit environ 140. Le problème de l'épuisement de la ressource ne se pose alors plus. Mais il s'agit d'une technologie différente, dite «à neutrons rapides», qui est aujourd'hui très peu développée. La problématique de la transition entre les réacteurs actuels et les réacteurs à neutrons rapides nécessiterait un article dédié, je ne l'aborderai pas ici.

*Retenons de cette analyse que dès la seconde moitié du siècle, l'humanité devra avoir trouvé des sources énergétiques alternatives aux fossiles pour poursuivre son développement. A fortiori si des politiques climatiques conduisent à ne pas exploiter toutes les ressources fossiles disponibles, à commencer par la plus émettrice de GES de toutes, à savoir le charbon.*

## 2. CARACTÉRISTIQUES DES ÉNERGIES RENOUVELABLES (EnR) ÉLECTROGÈNES

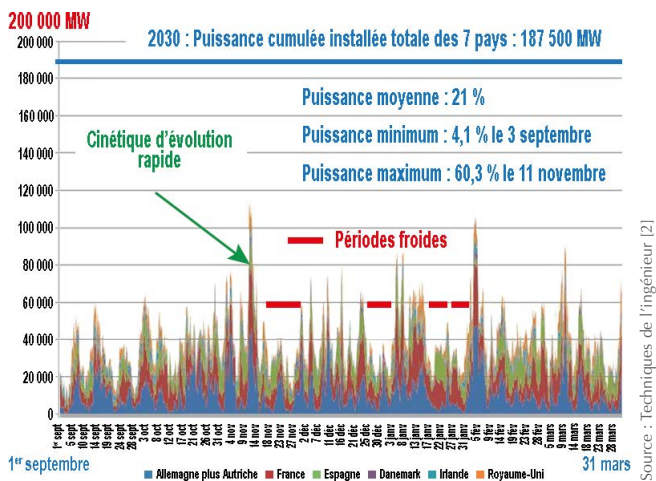
Nous nous concentrerons dans cette partie sur les sources renouvelables électrogènes qui offrent le potentiel maximum, à savoir le solaire photovoltaïque (PV) et l'éolien. Pour ne prendre qu'un seul élément de comparaison justifiant ce choix, le flux d'énergie solaire parvenant à la surface de la Terre est, en moyenne sur toutes les latitudes et en moyenne jour/nuit, de  $168 \text{ W/m}^2$ , alors que le flux géothermique, qui peut être localement élevé, n'est en moyenne que de  $0,1 \text{ W/m}^2$ . Nous évaluerons le potentiel mondial de l'ensemble des énergies renouvelables en fin d'article.

Le plus souvent, les informations concernant le développement des filières sont données en termes de puissance installée (dans le cas de l'éolien), appelée puissance-crête dans le cas du solaire 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 définit la puissance moyenne annuelle : c'est l'énergie totale produite divisée par le nombre de secondes dans une année. On désigne par facteur de charge annuel le rapport entre puissance moyenne et puissance installée. Mais dans la mesure où le flux solaire ou éolien est imposé par la nature, ce qui caractérise au plus près les systèmes énergétiques qui les utilisent est la puissance instantanée d'une installation, c'est-à-dire la puissance moyenne mesurée sur un bref intervalle de temps – disons un quart d'heure. En France, le site <http://www.rte-france.com/fr/eco2mix/eco2mix-mix-energetique> permet de suivre en temps réel et avec ce pas de temps les contributions des différentes sources d'électricité.

En France, le facteur de charge éolien annuel est, selon RTE (Réseau de transport d'électricité), de 22 %, et celui du solaire photovoltaïque de 13 % en moyenne nationale (moins de 11 % au nord, 16 % au sud). Mais qu'en est-il des puissances instantanées ? La question est importante, dans la mesure où 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.

En ce qui concerne l'électricité d'origine solaire, 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 d'heures-équivalent à pleine puissance est, en moyenne, d'environ 3,12 ( $3,12/24 = 0,13$ ), que nous approximerons à trois heures. La puissance-crête est donc de l'ordre de huit 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, la production étant, sous nos latitudes, quatre fois plus faible en hiver qu'en été (un facteur 2 pour la puissance solaire reçue et un autre facteur 2 pour la durée du jour)<sup>(7)</sup>.

Pour l'éolien, en revanche, on pourrait penser que s'opère un lissage des fluctuations, selon l'idée de bon sens : « il y a toujours du vent quelque part ». En réalité, cet effet de foisonnement existe, mais il est faible. C'est ce que montre la figure 3, où sont



**Figure 3** - Puissance instantanée délivrée pour les 8760 (366 × 24) heures de l'année par l'ensemble d'un parc éolien européen tel qu'envisagé par les intentions de politiques publiques pour l'année 2030, obtenue par extrapolation des puissances installées pendant l'hiver 2010/2011.

(7) Les pays du sud bénéficient de conditions bien plus favorables, avec un écart été/hiver qui se réduit avec la latitude jusqu'à pratiquement s'annuler dans la zone intertropicale.

reportées les productions instantanées de tous les parcs européens pendant un hiver typique (2010–2011). Pour maximiser l'effet de foisonnement, les données de chaque pays ont été réajustées par un facteur multiplicatif global correspondant aux projets annoncés pour 2030. De la sorte, la prépondérance de l'Espagne et de l'Allemagne, qui avaient en 2010 beaucoup plus de puissance installée que les autres pays, est réduite et l'effet de foisonnement est renforcé.

On voit que l'idée « de bon sens » n'est pas confirmée par les données : en effet, la puissance instantanée fluctue entre quelques pour cent de la puissance installée – disons 5 % – et 60 % de celle-ci. En réalité, cela ne doit pas surprendre, car chacun peut constater le soir lors du bulletin météo que les structures atmosphériques européennes s'étendent sur des milliers de kilomètres. Par conséquent, pour le dire de façon ramassée, *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 que l'on ait besoin en moyenne de 100 GW. Compte tenu du facteur de charge de 0,22, il faudra installer 450 GW. Le minimum de puissance instantanée sera donc de 22,5 GW, soit un déficit de 77,5 GW, et le maximum sera de 270 GW, soit un excédent de 170 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 en question a également développé une grande puissance éolienne : il aura lui aussi besoin d'exporter au même moment.

### 3. LA LOI DES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES

Replaçons-nous à présent dans le contexte concret de fonctionnement des réseaux électriques. Comme indiqué plus haut, un réseau électrique doit satisfaire en tout lieu  $x$  et à chaque instant  $t$  l'équation :

$$\text{Production}(x, t) = \text{Consommation}(x, t).$$

Comme la demande peut varier de façon non contrôlée, le gestionnaire du réseau doit disposer d'un indicateur lui permettant de savoir s'il faut augmenter ou diminuer la production. Le principe est le suivant : l'essentiel de la production utilise des dispositifs munis d'alternateurs où l'énergie se trouve dans les machines tournantes. Un appel de puissance sur le réseau se traduit par une ponction d'énergie de rotation, c'est-à-dire par une tendance à ralentir ces machines, donc à une diminution de la fréquence du courant (une augmentation de la fréquence dans le cas d'une surproduction passagère). Les variations de la fréquence servent donc d'indicateur d'un déséquilibre entre offre



et demande de puissance. La variabilité normale n'excède pas  $\pm 1\%$ , et les régulations commencent à se déclencher à des écarts de fréquence de quelques millièmes. Ces régulations se composent de «réserves de puissance» prévues à cet effet. Les réserves dites primaire et secondaire se déclenchent automatiquement, la réserve tertiaire, celle qui permet de rétablir durablement l'équilibre, est opérée manuellement. La stabilité du réseau est gérée spatialement à l'échelle de la plaque électrique européenne. La réserve de puissance primaire, par exemple, est de 3 GW mobilisables en moins de trente secondes, dont la quote-part est de 0,7 GW environ pour le réseau français.

La question de l'intermittence des sources prend tout son sens au regard de la nécessaire stabilité du réseau. En effet, lorsque ces sources sont minoritaires, les fluctuations de la demande sont les plus importantes, et elles représentent de 15 à 20 % de la puissance moyenne appelée. C'est ce que l'on constate sur une journée typique. La figure 4 est extraite du site de RTE eco2mix pour la journée du 18 octobre 2017. La puissance maximale appelée ce jour-là fut de 58,3 GW (position du curseur à 19 h 30), et la puissance minimale en milieu de nuit fut de 47,4 GW.

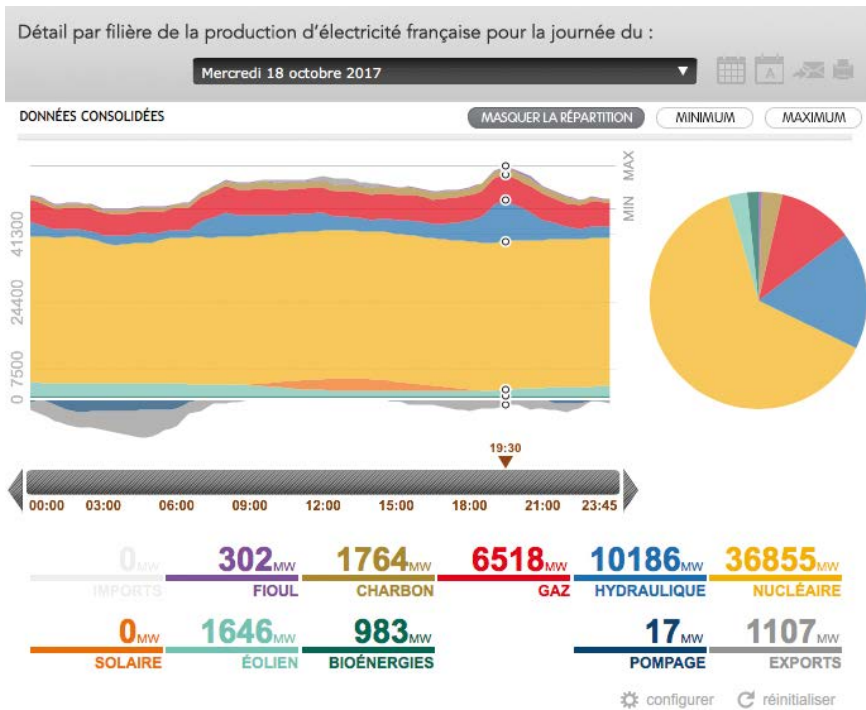


Figure 4 - Un exemple de production/consommation journalière d'électricité. On remarque que les fluctuations, de l'ordre de 15-20 % de la puissance moyenne, sont gérées principalement par l'hydroélectricité.

La puissance fournie par les centrales nucléaires est à peu près constante, et c'est l'hydroélectricité qui permet d'ajuster la production à la consommation<sup>(8)</sup>. Les autres sources fournissent un complément à peu près constant. Cette structure se retrouve peu ou prou tout au long de l'année. En été, la consommation est plus faible, il n'y a plus d'importation (la France est globalement exportatrice d'électricité), le fioul n'est plus utilisé, le charbon très peu, et le gaz et l'hydroélectricité sont en proportion plus faibles qu'en hiver.

#### 4. STOCKAGE EN CAS DE FORTE PÉNÉTRATION DES EnR INTERMITTENTES : COMMENT LE DIMENSIONNER ?

Mais si l'on envisage un développement important des sources intermittentes, la problématique de stabilité du réseau change du tout au tout, puisque les *fluctuations de la production prennent le pas sur les fluctuations de la demande*. Au lieu de 15-20 % de la puissance moyenne, ces fluctuations passent à plusieurs fois la puissance moyenne. D'où la question déterminante : *quel volume de stockage est nécessaire, en énergie et en puissance, pour que l'ensemble source + stockage délivre une puissance proche de la puissance moyenne ?* On se contentera ici d'évaluer des ordres de grandeur.

Pour le photovoltaïque, prenons un fonctionnement équivalent à trois heures à la puissance crête ( $P_c$ ). La puissance moyenne journalière est donc  $P_c/8$ , et la puissance de stockage nécessaire de  $7 P_c/8$  (puisque la puissance moyenne est consommée).

Pour l'éolien, si l'on cherche à valoriser toute l'énergie produite, la puissance de stockage à installer est donnée par la différence entre la puissance instantanée maximale, soit environ 60 % de la puissance installée ( $P_i$ ), et la puissance moyenne, qui est 22 % de  $P_i$ . On trouve donc 38 % de  $P_i$ .

Imaginons de remplacer la puissance nucléaire moyenne française, soit 45 GW<sup>(9)</sup>, par un mix éolien + PV. Compte tenu des facteurs de charge respectifs (0,22 pour l'éolien, 0,13 pour le PV), on sera amené à avoir une puissance crête ( $P_c$ ) plus grande que la puissance installée en éolien  $P_i$ . Prenons un facteur 3/2. Cela conduit à environ 160 GW de PV et 110 GW d'éolien. La puissance de stockage à envisager sera de

(8) En fait, toutes les centrales nucléaires ont la capacité de participer au réglage primaire – à hauteur de  $\pm 2\%$  de  $P_n$  ( $P_n = P$  nominale) – et au réglage secondaire – à hauteur de  $\pm 5\%$  de  $P_n$  – et environ la moitié font du réglage tertiaire (on est en train d'étendre cette proportion à deux tiers). La complémentarité entre hydraulique et nucléaire est très bonne pour ce dernier réglage : l'hydroélectricité est beaucoup plus rapide mais moins « massive » que le nucléaire.

(9) Les centrales nucléaires fournissent environ 400 TWh par an, ce qui correspond bien à une puissance moyenne de 45 GW.

$7 \times 160/8 + 0,38 \times 100$  soit environ 180 GW. Cette valeur est à comparer à la puissance de stockage dont la France dispose aujourd'hui, soit une quinzaine de gigawatts d'hydro-électricité pilotable et 5 GW de STEP <sup>(10)</sup>.

Comme alternative, peut-on envisager un stockage par batteries ? Imaginons que l'on veuille stocker 1 % de la consommation d'électricité française, soit 5 TWh. Cela correspond à environ trois jours de consommation (trois journées d'hiver sans vent). Or, l'énergie mondiale totale contenue dans toutes les batteries électrochimiques est de... 500 GWh. Il faudrait donc, pour la seule France, disposer de dix fois cette énergie. Ce n'est pas envisageable. On voit que la problématique de lissage des fluctuations de la production des sources intermittentes est radicalement différente de celle du développement des véhicules électriques. La constitution d'un parc d'un million de véhicules électriques, disposant chacun d'une batterie de 50 kWh, requiert de disposer de seulement 50 GWh, ce qui est parfaitement envisageable si l'on décide, comme cela semble être le cas, de développer un secteur industriel dédié. La recharge de toutes ces batteries au même moment et en six heures requiert une puissance d'environ 8 GW, ce qui est sans doute une borne supérieure. En étalant le besoin de recharge sur la journée et en allongeant la durée de charge, on peut réduire facilement d'un facteur 2 la puissance nécessaire. En tout cas, c'est tout à fait réalisable.

## CONCLUSION

Dans le présent article, on a analysé quelques caractéristiques essentielles des énergies de stock et des énergies de flux. Les énergies de stock, pilotables, sont évidemment épuisables, et il est par conséquent important de s'interroger sur les échelles de temps où les pics de production se produiront. Le modèle d'Hubbert permet de se faire une représentation simple de la production annuelle d'une source épuisable en fonction du temps. Il s'agit d'une projection plus que d'une prévision, mais l'approche fournit une aide indispensable à la réflexion concernant l'avenir à l'échelle du siècle. Les énergies de flux, inépuisables, mais dont les flux sont imposés par la nature, requièrent d'analyser les fluctuations temporelles de ces flux. C'est ce qui a été abordé ici pour deux formes d'énergie renouvelable électrogène : le solaire photovoltaïque et l'énergie éolienne. Cette analyse conduit à différencier l'énergie produite, selon qu'elle est pilotable ou intermittente. Du point de vue de la stabilité des réseaux électriques, un kilowatt-heure (kWh) aléatoire n'est pas équivalent à 1 kWh garanti. Dans le premier cas, il convient,

(10) Une station de transfert d'énergie par pompage (STEP) est la meilleure technologie de stockage de l'énergie (meilleur coût, meilleur rendement). Une centrale hydroélectrique de montagne est équipée d'une retenue d'eau en sortie de turbines. Lorsque la demande d'électricité est faible (par exemple la nuit), l'eau est pompée vers le réservoir haut pour reconstituer la réserve.

compte tenu de l'ampleur des fluctuations de la production qui sont du même ordre de grandeur que la puissance installée, de préciser comment elles sont gérées, tant en situation de manque de production qu'en situation de surplus de production. En l'état actuel des connaissances, pour satisfaire les conditions de stabilité des réseaux électriques, à savoir l'égalité en tout lieu et à chaque instant entre production et consommation, il paraît difficile d'avoir un taux de pénétration des EnR électrogènes intermittentes supérieur à environ 40 %, le reste devant être constitué de sources pilotables.

Il conviendrait d'analyser, dans un article séparé, comment les notions de stocks et de flux, avec d'autres notions (source concentrée/source diluée, source pilotable/source intermittente, efficacité énergétique/sobriété énergétique, stockage de l'énergie), permettent de se repérer dans le foisonnement des scénarios de transition vers des économies décarbonées, tous motivés par la contrainte climatique de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] J. Treiner, «Jouer avec les chiffres du climat : une approche par budget carbone », *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 109, n° 974, p. 753-765, mai 2015.
- [2] H. Flocard, J.-P. Pervès et J.-P. Hulot, «Électricité : intermittence et foisonnement des énergies renouvelables », *Technique de l'ingénieur*, n° 8586, octobre 2014.



**Jacques TREINER**

*Ancien professeur*

Université Pierre et Marie Curie (UPMC)

*Chercheur associé*

Laboratoire interdisciplinaire des énergies de demain (LIED/PIERI)

Université Paris-Diderot

Paris