



HAL
open science

L'énergie dans la société

Guillaume Blanc

► **To cite this version:**

Guillaume Blanc. L'énergie dans la société. Licence. Anthropocène, Université Paris Cité, France. 2023, pp.28. hal-04142701

HAL Id: hal-04142701

<https://hal.science/hal-04142701>

Submitted on 27 Jun 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

L'énergie dans la société

Guillaume Blanc

9 mai 2023

Ce cours fait le point sur le concept d'énergie dans nos sociétés ainsi que sur les émissions de dioxyde de carbone qui y sont liées en regard avec le réchauffement climatique. Seuls quelques aspects physiques sont abordés ici : en particulier, la problématique sanitaire (dangerosité inhérente à toute technologie) n'est pas traitée.

Pour plus de détails, on pourra consulter le chapitre 4 de Blanc & Noûs 2023.

1 Qu'est-ce que l'énergie ?

L'énergie est un concept omniprésent dans nos sociétés mais qui reste très flou dans l'esprit du public. La physique en donne cependant une définition très précise.

« Même si personne ne sait ce qu'est l'énergie « en soi », tout le monde exploite aujourd'hui cette quantité qui se conserve, tout en se transformant. » (Valentin 1995)

Le terme « énergie » vient du grec *energeia* signifiant « force en action. » Le dictionnaire CNRTL¹ en ligne la définit comme la « capacité d'un corps ou d'un système à produire du travail mécanique ou son équivalent. »

1.1 Définition physique

1.1.1 Énergie cinétique et énergie potentielle

L'énergie permet de quantifier (et comparer) des interactions entre des phénomènes physiques très différents. C'est une grandeur qui s'exprime en joules (J). Elle a la particularité de se conserver, c'est-à-dire qu'un système ayant une certaine quantité d'énergie *conserve* cette quantité d'énergie après une transformation ou lors d'une interaction avec ou par un phénomène physique, à condition que le système soit isolé, c'est-à-dire sans interaction avec le monde extérieur.

Elle se trouve sous deux formes :

- l'énergie cinétique dont le qualificatif exprime le mouvement, quantifie l'énergie liée à la vitesse d'un système :
- l'énergie potentielle qui exprime la *potentialité* d'un mouvement ultérieur. Elle peut revêtir de nombreuses formes (exprimés à une constante près) : énergie potentielle gravitationnelle; énergie potentielle électromagnétique; énergie potentielle de masse ou énergie de masse; énergie potentielle élastique, liée à la déformation d'un matériau; énergie potentielle chimique, liée à la variation du nombre de constituants d'un système; etc.

On peut également relier ces différentes formes d'énergies potentielles aux interactions fondamentales, gravitationnelle, électromagnétique, forte (responsable de la cohésion des noyaux atomiques), faible (responsable de la radioactivité β et de la fusion de l'hydrogène en hélium, entre autres).

1.1.2 Énergie absolue ou relative ?

1.1.3 Conservation

La somme de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle d'un système constitue l'énergie mécanique d'un système, qui est conservée à tout instant.

1. Voir : <http://www.cnrtl.fr/lexicographie/%C3%A9nergie>, consulté le 23 avril 2019.

Cela se traduit sous la forme d'un principe, le premier principe de la thermodynamique : l'énergie totale d'un système isolé est invariante au cours du temps. Tout en étant conservée l'énergie d'un système peut varier d'une forme à l'autre au gré de son évolution. Ces échanges se font par l'intermédiaire d'un travail ou d'un transfert thermique (ou quantité de chaleur).

On ne peut pas mesurer *directement* l'énergie d'un système, on peut seulement en déduire sa quantité à partir de la mesure de la variation d'une grandeur mesurable : température, vitesse, masse, intensité électrique, etc.

1.1.4 Énergie ordonnée et énergie désordonnée

On peut distinguer deux formes d'énergie : une énergie « ordonnée » et une énergie « désordonnée ».

- L'énergie désordonnée est associée à l'énergie thermique, qui est l'énergie liée à l'agitation thermique des constituants de la matière (énergie cinétique des particules très nombreuses aux mouvements erratiques constituant un système physique).
- L'énergie ordonnée est liée à l'énergie mécanique, cinétique² ou potentielle (gravitationnelle, électromagnétique, élastique, chimique...) du système macroscopique.

La différence fondamentale entre ces deux sortes d'énergies est que l'on peut intégralement transformer une énergie mécanique (ordonnée) en énergie thermique (désordonnée) alors que l'inverse n'est pas possible. Ce type de transformation est en effet interdit par le second principe de la thermodynamique, qui dit que l'entropie d'un système isolé (c'est-à-dire sans contact et sans lien énergétique avec l'extérieur) ne peut qu'augmenter.

1.1.5 Unité d'énergie

L'énergie s'exprime en joules (J), une unité dérivée du système international d'unités : $1 \text{ J} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$.

Il existe d'autres unités d'énergie qui sont utilisées en fonction des domaines d'activité :

- l'électron-volt (eV) est l'énergie d'un électron accéléré par une différence de potentiel électrique de un volt, $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$. Cette unité est utilisée en physique atomique et physique nucléaire.
- la calorie (cal) est l'énergie thermique nécessaire pour élever la température d'un gramme d'eau pure de $14,5 \text{ }^\circ\text{C}$ à $15,5 \text{ }^\circ\text{C}$ sous une pression atmosphérique de un bar, $1 \text{ cal} = 4,18 \text{ J}$. Cette unité est utilisée essentiellement en diététique (comme la Grande Calorie (Cal), $1 \text{ Cal} = 10^3 \text{ cal}$).
- le kilowatt-heure (kW·h ou kWh) est l'énergie consommée par un appareil d'une puissance de 1000 watts pendant la durée d'une heure, $1 \text{ kWh} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$. Cette unité est utilisée pour quantifier l'énergie électrique dans la société.
- la tonne de TNT est l'énergie libérée par l'explosion d'une tonne de l'explosif chimique trinitrotoluène, $1 \text{ t de TNT} = 4,184 \text{ GJ}$. Cette unité est surtout utilisée dans le domaine militaire.
- la tonne-équivalent-pétrole (tep) (ou toe : tonne of oil equivalent en anglais) correspond à l'énergie thermique dégagée³ par la combustion (on parle alors de *pouvoir calorifique*) d'une tonne de pétrole « moyen », $1 \text{ tep} = 41,868 \text{ GJ}$. Cette unité est utilisée dans l'industrie et en économie.
- autres unités : pour le gaz, le Btu (British thermal unit) est utilisé ($1 \text{ tep} = 3,97 \cdot 10^7 \text{ Btu}$) ; pour le charbon, le tec (tonne équivalent charbon) est utilisé ($1 \text{ tep} = 1,43 \text{ tec}$; $1 \text{ tec} = 29,3 \text{ GJ}$) ; pour le bois, on utilise le stère, qui équivaut à 1 m^3 apparent⁴ ($1 \text{ tep} = 6,22 \text{ st}$; $1 \text{ st} = 6,7 \text{ GJ}$) (OIE 2020).

2. Il s'agit ici de l'énergie liée au mouvement (ordonné) d'ensemble du système et non à celle liée aux mouvements désordonnés de ses constituants.

3. On constate ainsi qu'une tonne de pétrole contient environ dix fois plus d'énergie chimique que le TNT! La différence d'effet entre la combustion du pétrole (peu spectaculaire!) et l'explosion du TNT tient dans le fait que dans le premier cas, la combustion est lente, tandis que dans le second, elle est rapide, il s'agit d'une détonation.

4. Compte tenu de l'espace entre les bûches, cela représente entre $0,6$ et $0,8 \text{ m}^3$ de bois selon la taille des bûches.

1.1.6 Énergie ou puissance?

La puissance est la quantité d'énergie par unité de temps. Elle s'exprime en watt (W), $1\text{ W} = 1\text{ J}\cdot\text{s}^{-1}$. Elle exprime la vitesse à laquelle s'effectue un transfert d'énergie.

1.2 Définition sociétale

L'énergie est présente dans tous les actes de notre vie quotidienne. Dès que quelque chose change, il y a de l'énergie qui entre en jeu. Ce n'est pas une chose ou un objet, c'est un concept qui permet de quantifier ce qui change.

Notre corps est le siège de nombreuses transformations qui utilisent (forcément) de l'énergie : nos membres bougent grâce aux muscles qui transforment de l'énergie chimique en énergie mécanique, énergie chimique issue des aliments que nous ingérons. La transformation de cette énergie, via le métabolisme, permet aussi à nos organes de fonctionner, à notre température de se maintenir constante...

Les objets qui nous entourent ont été fabriqués grâce à l'énergie. Modifier la forme, faire changer d'état (liquide à solide, ou vice versa par exemple), assembler deux morceaux ou les séparer, etc., tout cela fait intervenir de l'énergie. Nous déplacer fait intervenir de l'énergie. Nous éclairer, nous chauffer, aussi.

Nous parlerons dans ce qui suit de production et de consommation d'énergie, mais, comme nous l'avons vu, l'énergie étant conservée, elle ne peut apparaître du néant et disparaître ensuite. Elle ne peut-être que transformée. La *production* d'énergie revient donc, par exemple, à transformer une énergie mécanique, par exemple dans un barrage, en énergie électrique, mais aussi en énergie thermique dans les frottements, la viscosité de l'eau, l'effet Joule, etc. La *consommation* d'énergie, par exemple d'essence dans une voiture, revient à transformer une énergie chimique en énergie mécanique (énergie cinétique), mais aussi en énergie thermique (frottements, viscosité de l'air, énergie thermique de combustion, pertes dans le moteur, etc.).

1.2.1 Énergie disponible

L'énergie *disponible* au sens physique du terme est l'énergie que fournit la transformation d'un système donné. Par exemple, pour les énergies fossiles, l'énergie disponible est celle qui est fournie par la réaction chimique de combustion. De même pour l'énergie nucléaire, l'énergie disponible est l'énergie de liaison des noyaux libérée lors d'une réaction de fission.

Pour l'énergie hydraulique, l'énergie disponible est l'énergie cinétique (issue de l'énergie potentielle de pesanteur) de l'eau dans les conduites forcées; pour l'énergie éolienne, c'est l'énergie cinétique du vent. Pour l'énergie issue de la biomasse, c'est l'énergie thermique obtenue par combustion de celle-ci.

Nous parlerons également de *source* d'énergie en guise de synonyme, même si cette dénomination est abusive : il ne peut y avoir création d'énergie *ex nihilo*.

1.2.2 Énergie primaire

L'énergie *primaire* est la forme sous laquelle une énergie est disponible après la première transformation (figures 1).

Il y a deux grandes familles de sources d'énergie primaire :

- les *énergies de stock* : on puise dans une réserve de matière limitée. Ce sont les combustibles fossiles (pétrole, gaz, charbon) et le minerai d'uranium.
- les *énergies de flux* : on prélève dans un flux d'énergie qui nous arrive continûment, que l'on exploite ou pas (hydraulique, éolien, solaire, géothermie, biomasse). Les énergies de flux sont des énergies renouvelables⁵, car on ne consomme pas de matière combustible⁶.

5. Les énergies renouvelables sont des énergies dont les flux sont sans cesse renouvelés à l'échelle humaine : il est donc possible de les considérer comme inépuisables.

6. Par contre les dispositifs construits pour récupérer ces énergies ne le sont pas, eux, renouvelables!

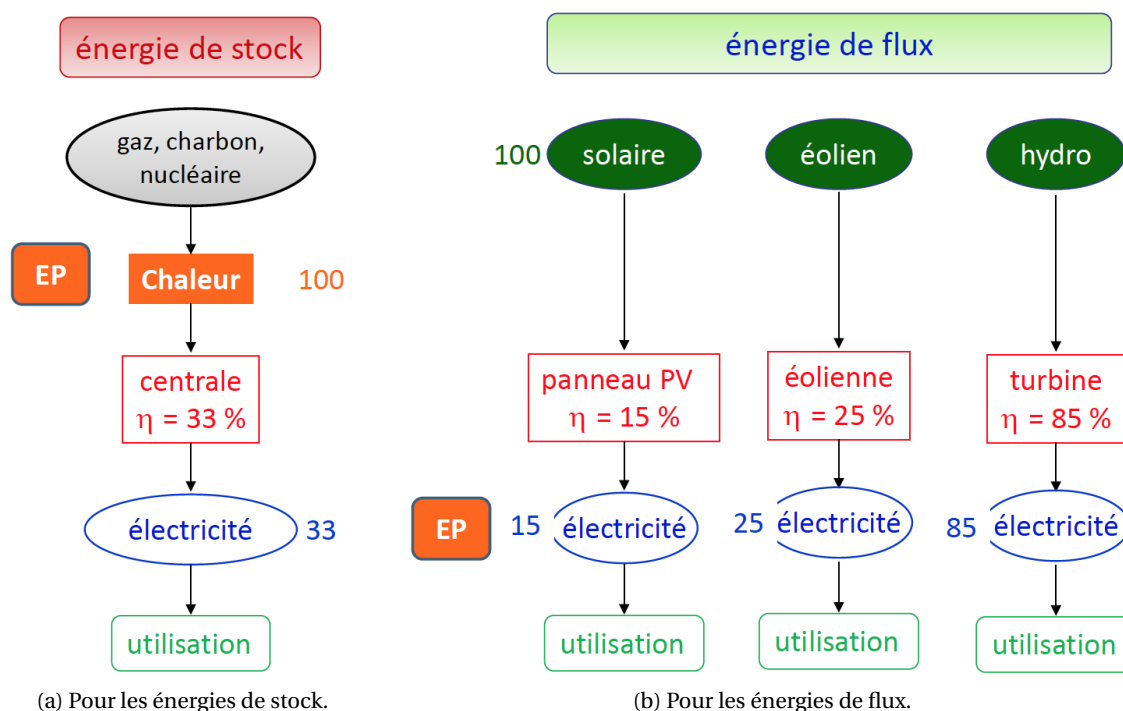


FIGURE 1 – Conventions définissant l'énergie primaire (EP) en fonction de la source. Le rendement des machines générant l'électricité utilisée est noté η . Source : Bouneau (2018b).

1.2.3 Énergie utile

L'énergie disponible n'est pas directement utilisable. L'énergie *utile* est donc celle qui est directement utilisée ou utilisable après transformation par des machines. La notion d'énergie utile dépend aussi de ce que l'on souhaite en faire : utile à quoi? À chaque étape de conversion de l'énergie disponible, on a un rendement :

$$\eta = \frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie disponible}} \quad (1)$$

Le rendement s'exprime dans le cas d'une transformation, comme la transformation thermodynamique de l'énergie thermique issue d'une centrale thermique en électricité.

Par exemple, l'énergie de fission nucléaire est transformée en électricité dans une centrale nucléaire dont le rendement global est d'environ 33 % (tenant compte du rendement thermodynamique de la machine, ainsi que de celui des turbines et des alternateurs). Ensuite l'électricité est transportée dans des câbles, avec des pertes de l'ordre de 10 %. Elle arrive chez le consommateur qui va l'utiliser pour alimenter une ampoule à incandescence. À ce niveau, si l'utilité est l'éclairage, alors le rendement est d'environ 10 %, si l'utilité est le chauffage, alors le rendement est d'environ 100 %. Dans le cas du chauffage, le rendement global est d'environ 30 % tandis que dans le cas de l'éclairage, le rendement global est d'environ 3 % (Bouneau 2018b).

Quand on parle d'énergie utile il faut donc bien préciser utile à quoi et à quel niveau de la chaîne de transformation et de transport elle se positionne, en tenant compte des différents rendements (machines) et des pertes (transport).

1.2.4 Énergie finale

L'énergie *finale* est un concept utilisé en économie pour désigner l'énergie achetée par le consommateur : électricité, essence, fioul... Il ne s'agit pas (forcément) d'énergie utile. Ainsi, pour le transport ou le chauffage, on achète de l'essence, du fioul ou du bois *avant* toute production d'énergie thermique : il s'agit donc d'énergie primaire. L'énergie utile correspondante (énergie thermique pour le

chauffage, énergie mécanique pour les transports) ne sera pas la même car le rendement du moteur ou de la chaudière n'est pas pris en compte. On achète donc de l'énergie disponible. Tandis que lorsqu'on achète de l'électricité, c'est après transformation, il s'agit directement d'énergie utile (voir figure 2).

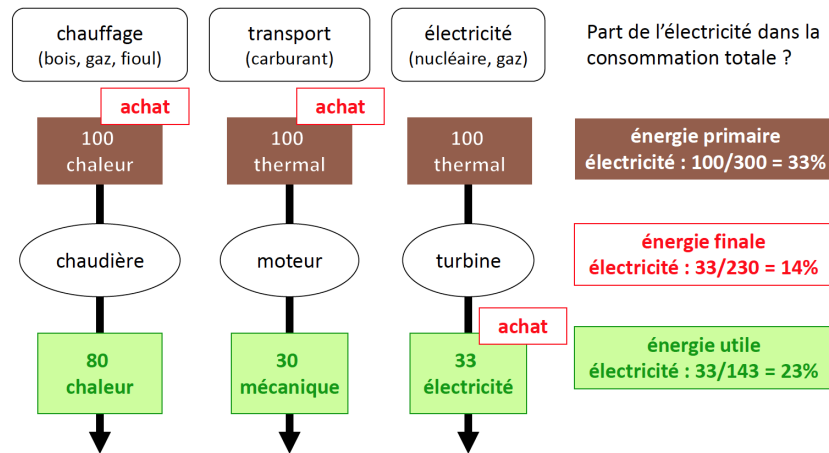


FIGURE 2 – L'énergie finale est celle que l'on achète, elle dépend donc du type d'énergie (Bouneau 2018b). Le concept est illustré ici pour déterminer la part de l'électricité dans la consommation totale d'énergie finale, si on suppose que au départ on a une quantité égale à 100 pour chacun des trois types d'énergie primaire : pour le chauffage, pour le transport et pour l'électricité. Selon que l'on parle d'énergie primaire, d'énergie utile ou d'énergie finale, le résultat n'est pas le même !

2 Différentes classes d'énergies

2.1 Sources et vecteurs

Les *sources* d'énergie (énergie disponible) peuvent être transportées (moyennant des transformations nécessaires) par l'intermédiaire de *vecteurs* qui sont l'électricité, l'énergie thermique (la chaleur) ou un carburant (essence, gasoil, fioul...).

Le vecteur est ensuite transformé en énergie consommable (énergie utile). À chaque étape (source → vecteur → consommation), l'énergie totale est conservée, mais elle ne l'est pas forcément sous la forme souhaitée : à chaque transformation est associé un rendement (Eq. (1)).

Le tableau 1 donne l'ordre de grandeur du rendement de quelques installations de transformation de l'énergie. On constate que généralement plus de la moitié de l'énergie initialement disponible est perdue (dans le sens où elle n'est pas utilisée, car non intégralement transformée dans la forme souhaitée.).

2.2 Puissances, facteurs de charge

Les installations et machines transformant des matières premières (pétrole, bois, chute d'eau, uranium, etc.) en énergie (thermique ou électrique) ont une capacité de produire (transformer) une certaine quantité d'énergie par unité de temps, à savoir une puissance (des joules par seconde ou watts). De même que des installations ou machines qui vont utiliser cette énergie vont le faire avec un certain flux ou puissance.

Ces installations ne fonctionnent pas à leurs capacités maximales en permanence : il s'agit de la *puissance installée* (ou de la *puissance crête* dans le cas du solaire photovoltaïque). La *puissance moyenne* (dans le temps) effective permet d'en déduire le facteur de charge f :

$$f = \frac{P_{\text{moyenne}}}{P_{\text{installée}}} \quad (2)$$

Installation	Transformation	Rendement
centrale nucléaire	thermique → cinétique → électricité	33 %
centrale à charbon ou au gaz	thermique → cinétique → électricité	30 – 50 %
moteur	thermique → cinétique	25 – 35 %
chaudière individuelle au gaz	thermique → chaleur	60 – 90 %
panneau photovoltaïque	lumière → électricité	10 – 20 %
turbine hydraulique	cinétique → électricité	85 %
éolienne	cinétique → électricité	25 %
batterie	électricité → électricité	80 %

TABLE 1 – Rendement de quelques installations de transformation de l'énergie (d'après Bouneau (2018a)).

Où $P_{moyenne}$ est la *puissance moyenne* de l'installation sur une année (énergie totale *produite* sur une année divisée par le nombre de secondes dans une année), $P_{installée}$ est la *puissance installée*, à savoir la puissance théorique lorsque l'installation fonctionne dans des conditions optimales.

2.3 Pilotable ou non pilotable

Nous avons vu que l'on peut classifier l'énergie de beaucoup de façons. Il y a notamment les énergies de flux et les énergies de stock.

Les énergies de flux nous parviennent de manière continue, il s'agit de les exploiter « au fil de l'eau » ! Il s'agit d'énergies dites « renouvelables », à l'échelle de leur temps d'exploitation par l'humanité : l'énergie solaire liée au flux de photons du Soleil, l'énergie éolienne liée au vent, l'énergie de la biomasse liée à la photosynthèse, l'énergie hydraulique liée au cycle de l'eau, l'énergie géothermique liée au flux d'énergie thermique issu du manteau terrestre... Les premières sont associées au rayonnement solaire (flux de photons, vents, cycle de l'eau, photosynthèse). La deuxième liée à la radioactivité de certains nucléides présents dans le manteau terrestre. L'intensité de son flux diminue au fur et à mesure de la décroissance radioactive, mais de façon imperceptible à l'échelle humaine.

Les énergies de stock sont associées à une quantité finie (ou lentement reconstituée) de matières premières sur Terre. D'une part les ressources dites fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel), renouvelables (à l'échelle du million d'années) mais bien plus lentement que la vitesse à laquelle elles sont consommées. D'autre part l'énergie nucléaire provenant de la fission de l'uranium, qui est en quantité limitée sur Terre : ce qui est « utilisé » est définitivement disparu. Ces énergies de stock sont donc épuisables.

Les énergies de stock sont *pilotables*, il s'agit de la capacité de ces sources d'énergie de pouvoir s'adapter à la demande, en particulier pour la production d'électricité. Certaines énergies de flux sont également pilotables, comme l'énergie hydraulique (issue des barrages) qui est d'ailleurs utilisée pour produire de l'électricité très rapidement, à l'échelle de quelques minutes, afin de réagir aux pics de consommation. L'énergie géothermique est également pilotable, le flux d'énergie thermique étant stable dans le temps. Tout comme l'énergie issue de la biomasse, puisque celle-ci peut être produite de manière continue et contrôlable.

Les centrales thermique nucléaires ou à charbon sont certes « pilotables » mais peu à même de répondre à un pic de la demande. En revanche elles sont « modulables » à l'échelle de quelques heures. Elles permettent néanmoins d'assurer la production électrique de base de manière complètement prédictible.

Les autres énergies de flux (solaire et éolien) sont *non pilotables* car leur quantité exploitable est fixée par la nature (présence de vent ou pas, flux de photons solaires liés à l'alternance jour-nuit, à la saison et à la couverture nuageuse). On ne peut pas les contrôler, seulement tenter de lisser leurs fluctuations.

La figure 3 illustre les différents types d'énergie.

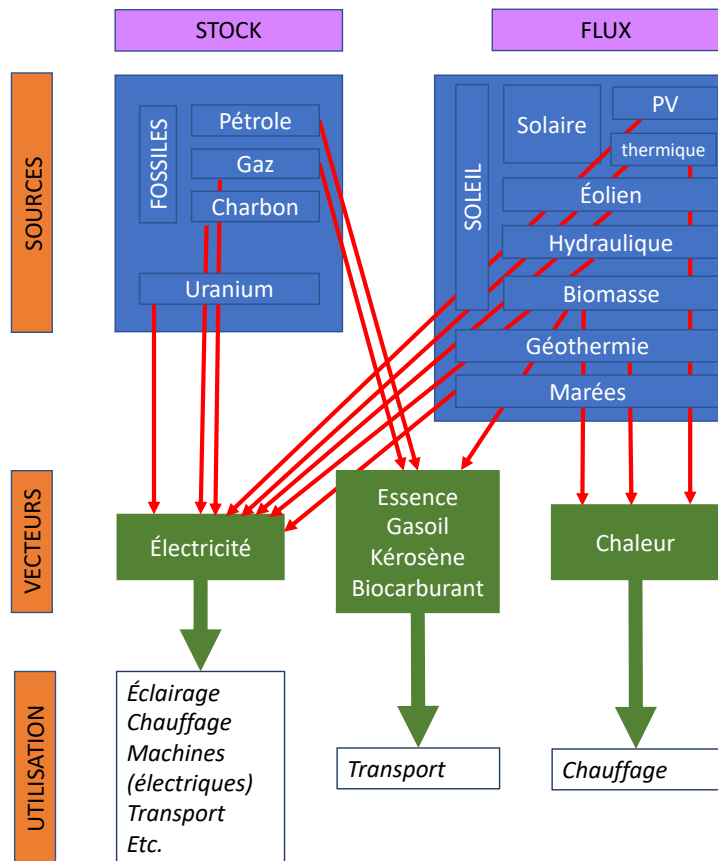


FIGURE 3 – Les différentes formes que revêt l'énergie. PV signifie « photovoltaïque ».

2.4 L'énergie grise et le taux de retour énergétique

On pourrait se poser la question suivante : combien faut-il d'énergie pour produire de l'énergie ? Les concepts d'énergie grise et de taux de retour énergétique répondent en partie à cette question.

2.4.1 L'énergie grise

L'énergie grise est la quantité d'énergie nécessaire pour produire une certaine quantité d'énergie. De manière générale, c'est la quantité d'énergie nécessaire pour fabriquer n'importe quel produit manufacturé, à savoir l'énergie consommée lors du cycle de vie. La figure 4 illustre de manière exhaustive *toute* l'énergie nécessaire dans l'ensemble de la vie d'une voiture : non seulement celle qui sert à produire et à acheminer le carburant, mais aussi celle qui sert à construire la voiture ainsi que les infrastructures qui lui permettent de rouler : routes, parkings, etc.

Cette évaluation de l'énergie grise n'est pas toujours aisée car de nombreux processus différents peuvent entrer dans le périmètre du cycle de vie (Hall et al. 2014).

2.4.2 Le taux de retour énergétique

Le taux de retour énergétique (TRE) ou *Energy Return On (Energy) Invested* (EROI) en anglais, est le rapport entre la quantité d'énergie totale produite à partir d'une source donnée et la quantité d'énergie dépensée pour obtenir cette énergie, à savoir l'énergie grise (voir, par exemple Treiner (2016)) :

$$\text{EROI} = \frac{E_{\text{produite}}}{E_{\text{dépensée}}} = \frac{E_{\text{produite}}}{E_{\text{grise}}} \quad (3)$$

où on a :

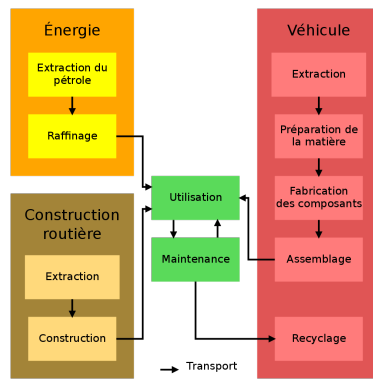


FIGURE 4 – Schéma illustrant l'énergie grise d'une voiture. Source : https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_grise.

- $E_{produite} = E_{grise} + E_{utilisable}$ = énergie totale produite
- $E_{dépensée} = E_{grise}$ = énergie utilisée pour produire $E_{produite}$
- $E_{utilisable}$ = énergie utile pour être consommée

On peut ainsi réécrire (3) :

$$EROI = \frac{E_{grise} + E_{utilisable}}{E_{grise}} = 1 + \frac{E_{utilisable}}{E_{grise}}$$

On voit ainsi que pour une technologie produisant de l'énergie utilisable par la société, si $EROI > 1$ alors il s'agit d'une « source » d'énergie. Mais si $EROI = 1$, dans ce cas, l'énergie produite sert uniquement à produire cette énergie sans gain pour la société, auquel cas : $E_{utilisable} = 0$. Par exemple, pour un processus ayant un EROI de 3, l'utilisation d'une unité d'énergie (E_{grise}) permet d'obtenir 3 unités ($E_{produite}$), soit un gain net de 2 unités ($E_{utilisable}$).

2.4.3 Limites de ces concepts

La notion d'énergie grise (et donc celle d'EROI) ne tient pas compte des autres ressources (limitées) en matière = sable pour le béton, métaux : cuivre, lithium, terres rares (néodyme), etc. Elle ne tient pas compte non plus des impacts environnementaux autres que ceux liés à l'énergie (à savoir l'émission de CO_2) : pollutions, paysages, biodiversité, etc.

2.5 Le paysage énergétique mondial

La consommation totale d'énergie primaire dans le monde était de 13,5 Gtep en 2017 (BP 2018) et de 13,9 Gtep ($5,8 \cdot 10^{20}$ J ou encore une puissance de 18,4 TW) en 2018 (BP 2019), elle augmente à un rythme d'environ 2,2 % par an (figure 5). La population mondiale étant de 7,5 milliards de personnes au début 2018. Ce qui représente une consommation énergétique moyenne de 1,8 tep/habitant/an. Les ressources fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon) contribuent à 85 % de la consommation totale, le nucléaire à 4,5 %, les renouvelables (essentiellement l'hydroélectricité et la biomasse – le bois) à 10,3 %.

3 L'électricité

L'électricité n'est pas une énergie primaire, c'est un vecteur; elle est néanmoins comptabilisée dans l'énergie finale. Un vecteur fort utile, puisqu'on peut le produire à partir de différentes sources, y compris des sources renouvelables ou peu polluantes. Il présente néanmoins un inconvénient majeur, la difficulté que l'on a à le stocker pour différer son utilisation.

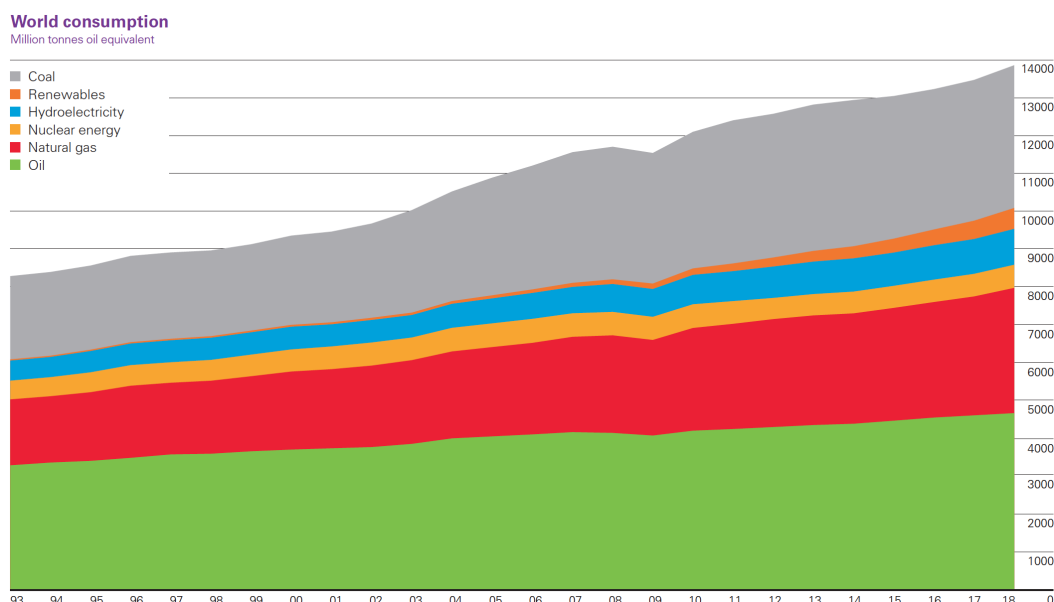
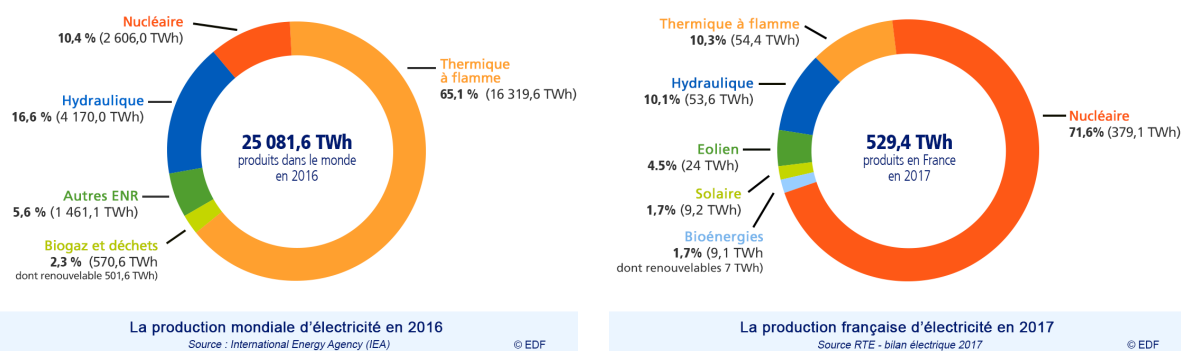


FIGURE 5 – Évolution de la consommation d'énergie dans le monde entre 1992 et 2018, en millions de tep (ordonnée), et pour les différents types d'énergies. (BP 2018).

En 2018, la France a consommé 437 TWh d'électricité (soit 37,5 Mtep ou $1,6 \cdot 10^{18}$ J), ce qui représente une puissance moyenne sur l'année de de 35 GW. Soit 27,4 % de la consommation d'énergie finale. La puissance installée est de 133 GW (RTE 2018a).

La même année, dans le monde, 9,9 Gtep d'énergie finales ont été consommés⁷, dont 1,9 Gtep d'électricité soit 19 % (figure 6).



(a) La production mondiale d'électricité en 2016. Source : RTE (2016). (b) La production française d'électricité en 2017. Source : RTE (2017).

FIGURE 6 – Production d'énergie électrique dans le monde en 2016, en France en 2017, par secteurs énergétiques.

3.1 Réseau électrique

Le réseau est constitué de lignes électriques fonctionnant à différents niveaux de tension, connectées entre elles par l'intermédiaire de postes électriques qui permettent de répartir l'électricité et de passer d'une tension à une autre grâce à des transformateurs.

7. <https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=Energy%20consumption&indicator=TFChySource>

Les pertes par effet Joule ne sont pas négligeables puisqu'en 2019, sur 537,7 TWh d'énergie électrique produite par la France, 11 TWh ont ainsi été perdus⁸, soit 2,2 % (RTE 2019). C'est pourquoi il est préférable de transporter l'électricité en haute tension, pour une puissance donnée, sur de longues distances.

Le courant dans un tel réseau est donc alternatif (afin de pouvoir modifier la tension facilement avec un transformateur) et sinusoïdal. En effet, la manière la plus simple de produire de l'électricité est de faire tourner un alternateur, qui, par induction transforme une énergie mécanique de rotation en énergie électrique. L'alternateur peut être entraîné par une turbine (barrage hydroélectrique, centrale thermique), par une éolienne, etc. De cette façon, comme il s'agit d'un mécanisme en rotation uniforme autour d'un axe, le courant produit sera naturellement sinusoïdal.

La fréquence du courant transporté est assurée par la rotation des alternateurs qui tournent tous à la même fréquence instantanée, proportionnelle à leur vitesse de rotation, c'est la fréquence *synchrone* (Sapy 2019).

La mise en réseau de l'acheminement de l'électricité permet également de profiter du caractère aléatoire de la demande de chaque consommateur, en la lissant sur l'ensemble de l'interconnexion, tout comme les pannes : la probabilité que tout le monde fasse fonctionner ses appareils électriques en même temps ou que des pannes surgissent simultanément est ainsi nulle en pratique (Krakowski 2016).

3.1.1 Puissance et fréquence

On peut réduire la complexité d'un réseau de transport de l'électricité aux lignes électriques et aux machines tournantes qui le constituent.

Un écart de 0,5 Hz de la fréquence, correspond à 1 % de la fréquence nominale. Ainsi $\Delta p = 2 \times 5 \times 0,01 = 0,1$, soit 10 % de la puissance nominale, soit 38 GW, ce qui représente environ 30 % de la puissance installée française, soit plusieurs dizaines de réacteurs nucléaires, par exemple. Inversement, une chute de puissance de 1 GW sur le réseau européen (par exemple la « perte » d'un réacteur nucléaire), correspond à un écart de puissance de 2,6 ‰. Et donc à une baisse de fréquence de $2,6 \cdot 10^{-4}$, soit 49,99974 Hz.

Notons que l'on peut suivre en direct la fréquence du réseau européen sur le site : <https://www.mainsfrequency.com/index.htm>.

3.2 Stabilité du réseau

L'électricité est un vecteur énergétique qui ne peut pas facilement se stocker massivement, en tout cas sous une forme immédiatement disponible et à un coût satisfaisant. Il faut donc qu'en permanence la production (nette, c'est-à-dire la production totale à laquelle on retranche les exportations et le stockage, on ajoute les importations et le destockage), soit égale à la consommation (nette, c'est-à-dire la consommation effective à laquelle on retranche les pertes diverses), et ce en tout point x du réseau et à chaque instant t , d'où la loi des réseaux électriques :

$$\text{Production}(x, t) = \text{Consommation}(x, t) \quad (4)$$

Cette condition est nécessaire au bon fonctionnement du système électrique. En revanche le maillage du réseau permet de faire face à différents aléas localisés (ouvrages hors-service, incidents, pic ou creux subit de consommation locale, etc.). Néanmoins le réseau n'est pas à l'abri d'un effondrement si les aléas locaux se répercutent sur l'ensemble.

Le pilotage du réseau revient essentiellement à maintenir la fréquence dans une plage de valeurs étroites autour de la valeur nominale, qui sont des conditions contractuelles. Les variations de la fréquence synchrone se propagent à l'ensemble du réseau en quelques millisecondes : du fait des interconnexions internationales, une perturbation importante en Europe du Nord peut être ressentie quelques secondes plus tard en Europe du Sud (Sapy 2019 ; Bornard et al. 2005).

8. Ce qui représente une puissance moyenne sur l'année de 1,2 GW : soit un réacteur nucléaire...

Le site : <https://www.entsoe.eu/data/powerflow-tool/> permet de simuler le pilotage d'un réseau électrique.

3.3 Le stockage

Les énergies de flux intermittentes, comme le solaire photovoltaïque et l'éolien, ne sont pas accessibles à la demande. Les périodes de production électrique optimales (éolien, solaire, etc.) ne sont généralement pas corrélées aux périodes d'utilisation de l'énergie. Il faut donc pouvoir la stocker afin de différer sa consommation.

Dans un mix énergétique sans moyens de production d'électricité pilotables et accessibles rapidement pour accéder aux fluctuations de la demande, le stockage est l'unique solution pour satisfaire l'équation d'équilibre des réseaux électriques (4).

Il y a toute une série de technologies qui sont étudiées, existantes sur le plan industriel ou à l'état de recherche dans les laboratoires. Le stockage de l'électricité est effectivement compliqué. Pour stocker 1 kWh, il faut 70 g d'essence, 30 kg de batterie au plomb, 5 à 8 kg de batterie Li-ion ou 3600 kg d'eau à une hauteur de 100 m (Ngô 2016).

La solution de stockage actuellement la plus efficace est celle du pompage hydraulique entre deux réservoirs situés à des altitudes différentes. Ce sont les *Stations de Transfert d'Énergie par Pompage* (STEP) ou centrales de pompage-turbinage. La technique consiste à remonter (par pompage) de l'eau d'un bassin ou d'un cours d'eau, pour la stocker dans un réservoir à plus haute altitude. L'eau est alors disponible pour être turbinée et produire de l'électricité en fonction de la demande (figure 7). Lorsque la demande en électricité est faible, ou bien que la production des sources renouvelables est élevée, elle est utilisée pour pomper l'eau vers le bassin supérieur. Le rendement d'une telle installation est assez élevé, entre 70 et 85 %.

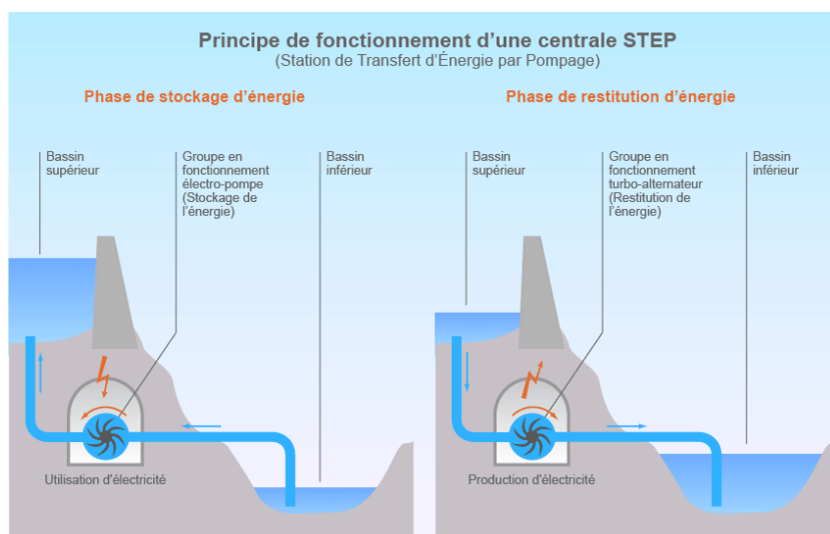


FIGURE 7 – Principe de fonctionnement d'une centrale de pompage-turbinage (STEP).

Début 2020, la capacité mondiale de stockage est de 174 GW (DOE 2020). Dont 168 GW en STEP (97 %), 2,4 GW (1,4 %) en stockage thermique, 2,0 GW en stockage électro-chimique (batteries), soit 1,1 %, dont 1,6 GW sous forme de batteries Li-ion.

La capacité de stockage représente ainsi environ 6,7 % de la consommation mondiale d'électricité.

En France, il y a 7 STEP (dont le barrage de Grand'Maison⁹ en Isère, d'une puissance de 1,8 GW) pour une puissance totale de 4,9 GW (soit 20 % de la puissance hydroélectrique installée – 25 GW en 2018), mobilisables en quelques minutes.

9. https://fr.wikipedia.org/wiki/Barrage_de_Grand%27Maison.

3.4 Les énergies intermittentes

L'énergie éolienne dépend de la présence de vent. La figure 8 montre le côté intermittent de cette production sur une année, avec des variations importantes, de moins de 1 % de la capacité installée à moins de 90 % au maximum. Ces variations dépendent des vents, donc de la météorologie, mais elles sont généralement complètement décorréées de la demande en électricité. La figure 10 montre le caractère stochastique de la production d'énergie éolienne. L'énergie solaire obéit à l'alternance jour-nuit (figures 9 et 10), mais le maximum de production en journée reste relativement aléatoire.

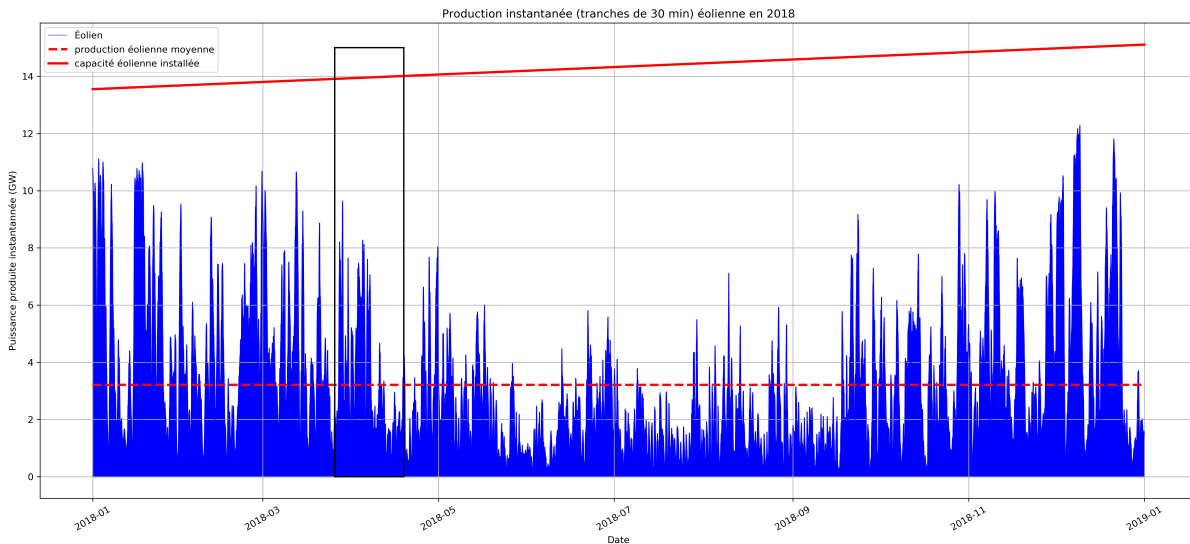


FIGURE 8 – Vue générale de la production instantanée (par pas de 30 min) éolienne instantanée sur l'année 2018. La capacité installée varie de de 13,55 GW début 2018 à 15,11 GW fin 2018 (RTE 2017 ; RTE 2018a). La production moyenne est de 3,21 GW. La production minimale est de 83 MW (soit 0,6 % de la capacité moyenne installée), la production maximale de 12,3 GW (soit 86 % de la capacité moyenne installée). Le rectangle noir représente la partie zoomée sur la figure 10. Les données sont issues du site : <https://www.rte-france.com/fr/eco2mix/eco2mix-mix-energetique>.

La question de l'intermittence des sources prend tout son sens au regard de la nécessaire stabilité du réseau (Treiner 2018). Les fluctuations journalières de la demande sont de l'ordre de 15 à 20 % en France.

4 Le CO₂

Nous avons vu que toutes les activités humaines requièrent de l'énergie qu'elles transforment d'un état à un autre. La quasi-totalité (85 %) de l'énergie ainsi consommée (transformée) est issue de ressources fossiles dont la transformation nécessite une combustion produisant du dioxyde de carbone qui s'accumule dans l'atmosphère, perturbant ainsi le cycle naturel du carbone.

4.1 Unités

Les quantités de dioxyde de carbone ou de carbone stockées et échangées sont généralement exprimées dans diverses unités. La plupart se ramènent à des masses de carbone (C) ou de dioxyde de carbone (CO₂) par unité de temps (souvent l'année). On parle alors d'équivalent CO₂ pour les gaz à effet de serre autre que le dioxyde de carbone : il s'agit alors de la masse de dioxyde de carbone qui provoque le même forçage radiatif que la masse de gaz en question. Les masses de ces autres gaz sont converties en masse de CO₂ par l'intermédiaire du pouvoir de réchauffement global (PRG) ; elles dépendent donc de la définition du PRG choisie, et en particulier de l'horizon temporel (qui est fixé à 100 ans par convention).

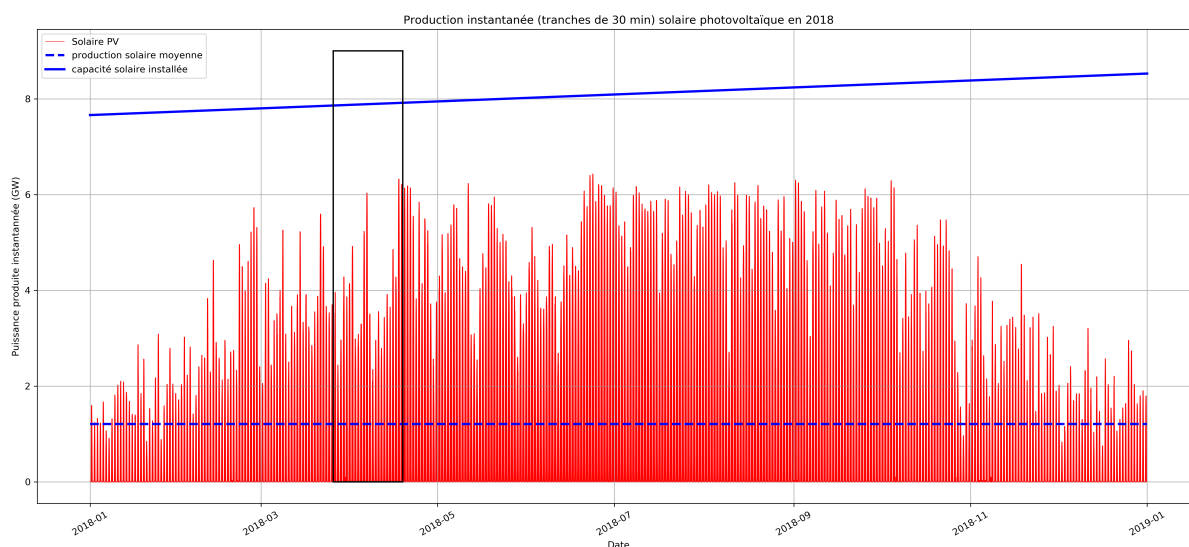


FIGURE 9 – Vue générale de la production solaire photovoltaïque sur l’année 2018. La capacité installée varie de de 7,66 GW début 2018 à 8,53 GW fin 2018 (RTE 2017 ; RTE 2018a). La production moyenne est de 1,21 GW. La production maximale est de 6,4 GW (soit 79 % de la capacité moyenne installée). Le rectangle noir représente la partie zoomée sur la figure 10. Les données sont issues du site : <https://www.rte-france.com/fr/eco2mix/eco2mix-mix-energetique>.

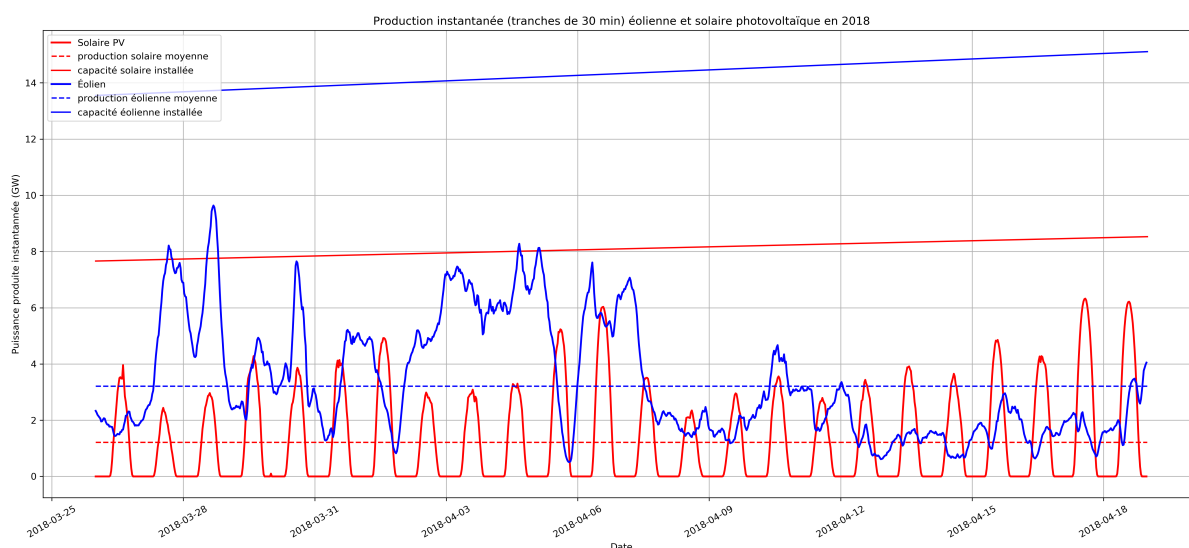


FIGURE 10 – Zoom sur la période printanière de la production instantanée éolienne et photovoltaïque allant du 26 mars 2018 au 19 avril 2018. Les données sont issues du site : <https://www.rte-france.com/fr/eco2mix/eco2mix-mix-energetique>.

Voici quelques unes de ces unités :

- 1 tC (tonne de carbone) ; pour les flux à l’échelle de la planète, on utilise souvent la GtC (gigatonne de carbone) ;
- 1 tCO₂ (tonne de CO₂ ou plus souvent tonne *équivalent*-CO₂ pour les cocktails de gaz à effet de serre – ainsi, par exemple, comme le pouvoir de réchauffement global du méthane est de 25, 1 kg de méthane = 25 kgCO₂éq) ;
- 1 GtCO₂ = 0,273 GtC et 1 GtC = 3,664 GtCO₂ ;

- 1 PgC (péta-gramme de carbone) = 10^{15} g de C = 1 GtC;
- 1 ppm (partie par million, en nombre) dans l'atmosphère correspond à 2,13 GtC;
- 1 ppb = 10^{-3} ppm (partie par milliard).

4.2 Les émissions de GES

4.2.1 Qu'est-ce ?

Il faut distinguer les émissions de gaz à effet de serre (GES) de la quantité de gaz à effet de serre observée dans l'atmosphère. Les émissions de GES par les activités humaines sont des estimations (et non des mesures directes) qui dépendent des connaissances scientifiques et des données disponibles.

Les gaz à effet de serre retenus pour ces bilans sont ceux retenus par le protocole de Kyoto ¹⁰ :

- le dioxyde de carbone (CO₂);
- le méthane (CH₄);
- le protoxyde d'azote (encore appelé oxyde nitreux ou gaz hilarant) (N₂O);
- l'hexafluorure de soufre (SF₆);
- les hydrofluorocarbures (HFC);
- les perfluorocarbures (PFC) ou hydrocarbures perfluorés.

Les émissions sont données en tCO₂ (ou en tC), à savoir la quantité de CO₂ qu'il faudrait émettre pour avoir le même effet de serre. On ne compte que les émissions anthropiques.

4.2.2 Comment les calculer ?

L'émission $E_{a,t}$ d'une activité a pendant un intervalle de temps t est exprimée schématiquement par (IPCC 2006 ; CITEPA 2019) :

$$E_{a,t} = A_{a,t} \times F_a \quad (5)$$

où $A_{a,t}$ est la quantité d'activité relative à l'activité a pendant l'intervalle de temps t , et F_a est le facteur d'émission relatif à l'activité a .

Par exemple, dans le cas de la combustion de ressources fossiles, le facteur d'émission est la masse de GES produite par unité de masse ou de volume de combustible.

On distingue généralement trois niveaux d'émissions (ADEME 2014) :

- Scope 1 : les émissions physiquement et directement produites par une activité.
- Scope 2 : les émissions d'une énergie consommée qui ne sont pas émises sur le lieu de consommation, mais sur le lieu de production (électricité et réseaux de chaleur).
- Scope 3 : les émissions indirectes (comme le transport de marchandises).

4.2.3 Empreinte carbone

L'empreinte carbone est un indicateur qui tient compte de l'ensemble des émissions liées à la demande intérieure du pays : émissions directes de GES des ménages (logement et transport), émissions issues de la production intérieure (hors exportation), émissions liées à l'importation de biens et services pour les entreprises ou les ménages (les importations ré-exportées ne sont pas prises en compte), contrairement à l'inventaire national qui ne tient pas compte des importations (figure 11).

10. Le Protocole de Kyoto est un accord international visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre, qui a été signé en 1997 lors de la 3^e COP à Kyoto au Japon; il est entré en vigueur en 2005.

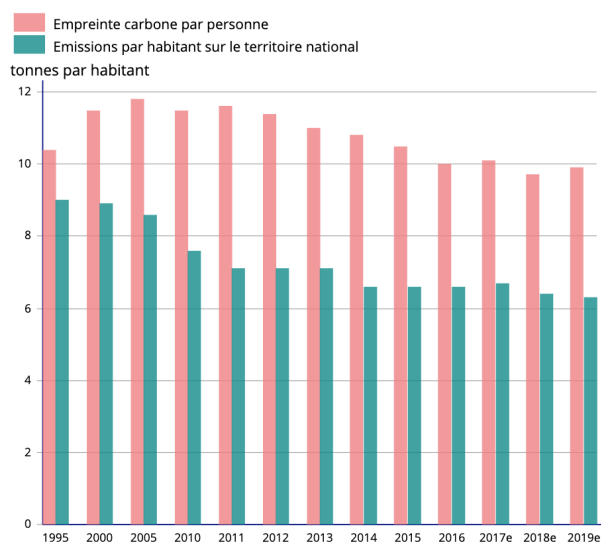


FIGURE 11 – Comparaison entre les périmètre de l’empreinte carbone et l’inventaire national en France en 2016. L’empreinte carbone et l’inventaire national portent sur les trois principaux gaz à effet de serre (le CO₂, le CH₄ et le N₂O), les données sont non corrigées du climat. Tiré de SDES (2021).

4.2.4 Facteurs d’émission des énergies courantes

Le facteur d’émission intervenant dans l’équation (5) est une donnée tabulée. On peut trouver les facteurs d’émission de nombreuses substances et processus dans la *Base Carbone* de l’ADEME (<https://www.bilans-ges.ademe.fr/>). Nous en donnons quelques-uns ici. Ainsi le tableau 2 donne les facteurs d’émission de quelques combustibles courants, à savoir la quantité de CO₂ émise en grammes de CO₂ par unité d’énergie produite (énergie thermique émise par la combustion), en kWh. Elle donne les émissions *directes* (1^{re} colonne) lors de la combustion, hors chaleur latente de vaporisation de l’eau (Pouvoir Calorifique Inférieur – PCI). La 2^e colonne donne les émissions après analyse du cycle de vie (ACV). Ce type d’analyse recense et quantifie, tout au long de la vie d’un produit, les flux physiques de matière et d’énergie associés aux activités humaines (ADEME 2018). Les facteurs d’émissions peuvent varier en fonction de la composition des combustibles et des méthodes employées. L’ADEME, dans la *Base Carbone*, estime l’incertitude à $\pm 5\%$ pour les produits pétroliers et à $\pm 20\%$ pour le charbon et ses dérivés.

Combustibles	Émissions directes (gCO ₂ /kWh)	Émissions ACV (gCO ₂ /kWh)
Charbon	345	377
Fioul lourd	283	324
Fioul domestique	272	324
Gazole	256	323
Essence (SP95, SP98)	253	314
GPL	233	260
Gaz naturel	204	243
Bois énergie	18,8	29,5

TABLE 2 – Facteurs d’émission CO₂ des combustibles courants (Pouvoir calorifique inférieur, c’est-à-dire sans tenir compte de la chaleur latente de l’eau produite par la combustion), d’après la *Base Carbone* de l’ADEME. La première colonne concerne les émissions directes lors de la combustion. La deuxième colonne donne la valeur après analyse du cycle de vie (ACV).

Le tableau 3 donne les facteurs d'émissions pour différentes filières de production d'électricité, selon différentes sources. On constate de grandes différences selon les sources en particulier pour le nucléaire et l'hydraulique. Cela vient du fait que pour certaines estimations un peu anciennes, les normes de l'analyse en cycle de vie (ACV) ne sont pas les mêmes que pour les analyses plus récentes. De plus, l'estimation donnée par l'ADEME se base sur le contexte français, où l'électricité est largement décarbonée, donc la construction d'une centrale nucléaire rejette moins de CO₂ que dans les pays où l'électricité est produite surtout à partir de charbon (comme les États-Unis auxquels se réfèrent les deux études de Singapour et Stanford).

Filières	D'après la <i>Base Carbone</i> ADEME (janvier 2015)	Médiane d'émissions issue du rapport du GIEC (2014)	Rapport de l'université de Singapour (2008)	Rapport de l'université de Stanford (2009)
Nucléaire	6	12	66	9 à 70
Charbon	1038	820	960 à 1050	
Gaz	406	490	443 à 611	
Fioul	704		778	
Hydraulique retenue	4	24	10	17 à 22
Photovoltaïque	55	41 à 48	32	19 à 59
Éolienne	7,3	11 à 12	9	2,8 à 7,4
Géothermie	45	38	38	15,1 à 55
Biomasse		230	14 à 31	
Solaire thermique		27	13	
Biogaz			11	

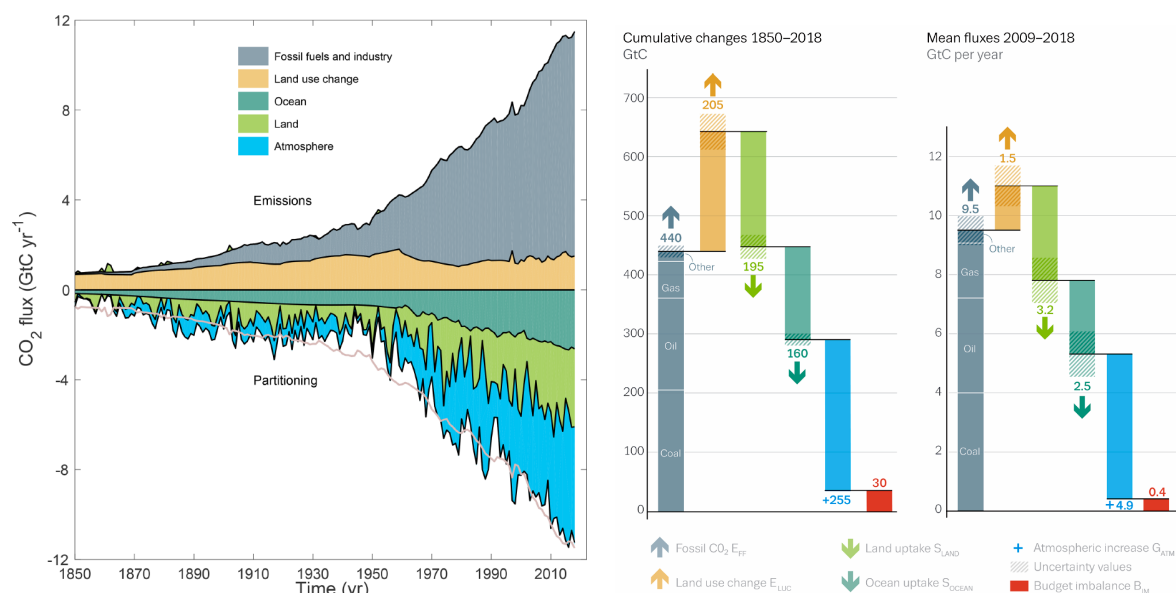
TABLE 3 – Émissions directes (CO₂ + ACV) par kWh de diverses filières de production d'électricité, en gCO₂/kWh, selon diverses estimations. Tableau issu de : https://fr.wikipedia.org/wiki/Empreinte_carbone_de_l%27%C3%A9lectricit%C3%A9.

4.2.5 Le flux de carbone anthropique

Entre 1750 et 2011, la combustion des carburants fossiles (charbon, gaz, pétrole) et la production de ciment ont relâché dans l'atmosphère environ 375 GtC (1375 GtCO₂). La déforestation a ajouté 180 GtC (660 GtCO₂) de plus. Sur ces 555 GtC (2035 GtCO₂), moins de la moitié (240 GtC ou 880 GtCO₂) se sont accumulés dans l'atmosphère, le reste ayant été absorbé par les océans et les écosystèmes terrestres. La figure 12a montre les émissions annuelles de dioxyde de carbone à partir des combustibles fossiles et de la fabrication du ciment (qui nécessite une utilisation de combustibles fossiles pour chauffer le mélange de calcaire – ce qui rejette du CO₂ initialement piégé dans les carbonates – et d'argile) et de l'utilisation des terres (essentiellement la déforestation). Différents puits naturels permettent d'absorber environ la moitié de ces émissions (océans et sols). La figure 12b montrent les flux de carbone anthropiques cumulés depuis l'ère industrielle et annuels en moyenne sur la dernière décennie : chaque année 11 GtC (40 GtCO₂) sont relâchées dans l'atmosphère, dont la moitié est absorbée par les puits de carbone que sont les océans et les sols (végétation, etc.).

L'augmentation de la quantité de CO₂ dans l'atmosphère en 2019 a été de $5,2 \pm 0,9$ GtC (soit une augmentation de la concentration de $2,5 \pm 0,4$ ppm), ce qui amène la concentration atmosphérique de CO₂ à un niveau de 410 ppm (Friedlingstein et al. 2019).

La figure 13 montre l'évolution des émissions de gaz à effet de serre depuis le milieu du XIX^e siècle. La figure 13a différencie l'évolution des principaux gaz, dioxyde de carbone, méthane, protoxyde d'azote. La figure 13b montre cette même évolution selon les secteurs d'émission, l'énergie, l'agriculture, l'industrie et la construction et les déchets. Enfin, la figure 13c montre l'évolution des



(a) Les émissions anthropiques annuelles de CO₂ par la combustion des ressources fossiles (gris), ainsi que par le changement d'utilisation des terres, essentiellement la déforestation (brun), partitionnée entre l'atmosphère (bleu), la terre (vert) et l'océan (turquoise). La courbe rose est le reflet des émissions totales : il y a des incertitudes sur l'équilibre budgétaire. Tiré de Friedlingstein et al. (2019).

(b) Flux de carbone anthropique. À gauche, les flux cumulés sur la période 1850-2018; à droite les flux moyens annuels entre 2009 et 2018. Tiré de Friedlingstein et al. (2019).

FIGURE 12 – Représentations des flux anthropiques de carbone.

émissions pour les sept principales régions émettrices : les pays émergent (Chine, Inde, etc.) voient leurs émissions croître fortement depuis le début des années 2000, en particulier pour la Chine (dont une bonne partie pour nos importations!).

En 2017, la Chine est le premier pays émetteur de CO₂ avec 28,2 % des émissions, les États-Unis sont en deuxième place avec 14,5 %. La France arrive en vingtième position pour 0,9 % des émissions¹¹.

5 La transition énergétique

La transition énergétique est une modification structurelle profonde de la société, visant à changer les modes de consommation de l'énergie afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre. Il existe différents scénarios plus ou moins réalistes d'un point de vue physique. Au vu de ce qui précède, réduire drastiquement la part des énergies carbonées doit constituer un objectif majeur pour les sociétés dès à présent. Plusieurs trajectoires sont envisageables pour y parvenir. Elles sont éminemment politiques (selon l'objectif de société souhaité), la science peut seulement évaluer leur côté faisable compte tenu des flux physiques. Les quelques notions abordées jusqu'ici devraient fournir les outils pour s'en faire une idée objective.

Compte tenu de l'état de la planète (outre la crise climatique, l'humanité doit faire face à un effondrement de la biodiversité, à de multiples pollutions, etc.), la transition énergétique n'est qu'un aspect des diverses modifications qui attendent nos sociétés, de gré (en anticipant du mieux possible les changements pour nous y préparer) ou de force (en nous adaptant en temps réel quand les crises seront ancrées dans nos quotidiens), dans les décennies à venir.

11. Source : https://fr.wikipedia.org/wiki/Liste_des_pays_par_%C3%A9missions_de_dioxyde_de_carbone.

A Les différents types d'énergie

A.1 Les énergies de stock

Les énergie de stock sont des énergies épuisables (en quantité par définition limitée), mais dont il est possible de piloter leur flux avec une certaine latitude (Treiner 2018).

A.1.1 Les énergies fossiles

Les combustibles fossiles sont riches en carbone et sont issus de la dégradation de matières organiques (méthanisation) enfouies dans le sol depuis des centaines de millions d'années. Il s'agit du pétrole, du charbon, de la tourbe et du gaz naturel. Ces sources ne sont pas renouvelables (à l'échelle de l'humanité), car elles demandent des millions d'années pour se constituer, et sont utilisées bien plus rapidement.

Quand un être vivant meurt, il va se décomposer. Le carbone qui le compose est transformé en dioxyde de carbone dans un milieu riche en oxygène (aérobie). Dans un milieu pauvre en oxygène (anaérobie), comme sur un fond marin, c'est l'activité bactérienne qui va décomposer la matière, formant un composé solide, le kérogène, sorte d'état intermédiaire entre la matière organique et les combustibles fossiles, composé surtout de carbone et d'oxygène. La tectonique des plaques va soumettre le kérogène à des pressions et à des températures élevées (50 °C à 120 °C). Il s'ensuit alors une décomposition chimique (pyrolyse) qui conduit à la formation de pétrole et de gaz naturel. Le charbon est formé à partir de végétaux plus élaborés (arbres, plantes...), dont la pyrolyse du kérogène fournit, plus la pression et la température (donc la profondeur) augmentent, de la tourbe, de la lignite, de la houille et enfin de l'antracite. La fraction de carbone augmente de moins de 55 % pour la tourbe à plus de 90 % pour l'antracite.

Constituées d'atomes de carbone et d'hydrogène (le méthane a le rapport H/C le plus élevé, l'antracite et certaines houilles sont composés de carbone presque pur), les combustibles fossiles sont des hydrocarbures. Emprisonnés dans les sous-sols de la Terre, ils sont extraits de différentes manières :

- par puisage, en ce qui concerne le pétrole et le gaz naturel;
- par extraction directe à la surface des sols, pour la tourbe;
- par extraction dans des mines, comme pour le charbon;
- par extraction dans des mines à ciel ouvert, en particulier pour le lignite.

Le charbon a été le moteur de la révolution industrielle. Dès la fin du XVII^e siècle, on se rend compte que sa combustion permet de dégager suffisamment d'énergie thermique pour faire fonctionner les machines à vapeur. Son utilisation permet également de limiter l'utilisation du bois et donc de la déforestation. Le pétrole devient l'objet d'une exploitation industrielle au milieu du XIX^e siècle. Le gaz naturel fut d'abord utilisé pour l'éclairage (éclairage public au gaz dans les années 1820 aux États-Unis), avant d'être utilisé comme combustible pour propulser des machines et pour le chauffage. Ce n'est qu'après la Seconde Guerre Mondiale qu'il va susciter un intérêt en ce sens.

A.1.2 Le nucléaire

L'énergie nucléaire (électricité) est une énergie de stock, actuellement basée sur l'uranium qui est un minéral présent dans la croûte terrestre, donc en quantité limitée.

La consommation d'électricité nucléaire dans le monde est de 611 Mtep ($2,6 \cdot 10^{19}$ J) en 2018 (BP 2019), soit 4,4 % de l'énergie primaire consommée (13865 Mtep = $5,8 \cdot 10^{20}$ J). Toujours en 2018, 26615 TWh ($9,6 \cdot 10^{19}$ J) d'électricité ont été générés dans le monde, dont 2701 TWh ($9,7 \cdot 10^{18}$ J) par le nucléaire (BP 2019), soit 10 %.

En France, la production d'électricité nucléaire (RTE 2019) a été de 380 TWh en 2019 (70,9 % de la production totale d'électricité), soit 43 GW en moyenne sur l'année, pour une capacité de production de 63,1 GW (soit 47 % de la capacité de production totale française qui est de 135 GW), d'où un facteur de charge de 68 %.

A.2 Les énergies de flux

Les énergies de flux sont : l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie marine, l'énergie hydraulique, l'énergie issue de la biomasse, l'énergie géothermique. Ce sont des énergies inépuisables (à l'échelle humaine), que l'on appelle donc « renouvelables » (à l'échelle humaine). Néanmoins leur flux est généralement variable, spatialement et/ou temporellement. Pour utiliser ces énergies, il faut connaître ces flux, leur régularité ou périodicité, leur intensité, et les possibilités de les récupérer ou de les transformer en énergie que nous puissions utiliser.

À part la géothermie, issue de la désintégration radioactive des roches dans les profondeurs de la Terre, et l'énergie issue des marées (issue de l'énergie gravitationnelle du Soleil et de la Lune) les autres énergies sont toutes directement ou indirectement issues de l'énergie radiative solaire. Cette énergie est à l'origine de la circulation atmosphérique, et donc des vents dont l'énergie mécanique prélevée est l'énergie éolienne ou l'énergie de la houle marine; du cycle de l'eau (évaporation et précipitations), donc de l'énergie hydraulique; des plantes qui croissent par la photosynthèse et forment la biomasse.

La surface terrestre (sous l'atmosphère), reçoit en moyenne sur toute sa surface et sur une rotation (24 h), environ $170 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. La surface de la Terre faisant $4\pi R^2 = 5,1 \cdot 10^{14} \text{ m}^2$, elle reçoit (en moyenne) chaque seconde $8,7 \cdot 10^{16} \text{ J}$ de la part du Soleil.

L'humanité consomme environ 14 Gtep/an, soit $5,9 \cdot 10^{20} \text{ J} \cdot \text{an}^{-1}$ ce qui représente une puissance moyenne de $1,9 \cdot 10^{13} \text{ W} = 19 \text{ TW}$. Ainsi, l'énergie consommée en une année parvient à la surface de la Terre en environ 2 h de la part du Soleil (en moyenne), bien que de manière diffuse et difficilement « récupérable » en l'état.

Environ 1 à 2 % de l'énergie solaire parvenant à la surface terrestre est transformée en vent, soit une puissance d'environ 900 TW (Miller et al. 2011).

Sur $8,7 \cdot 10^4 \text{ TW}$ d'énergie solaire parvenant à la surface de la Terre, environ 180 TW est convertie en biomasse.

A.2.1 L'énergie solaire photovoltaïque

Il s'agit de l'énergie électrique récupérée grâce à des cellules photovoltaïques. L'effet photoélectrique¹² à l'origine de ces cellules est un effet physique qui désigne l'émission d'électrons par un matériau soumis à un flux de photons. Cette propriété de certains matériaux (métaux, semi-conducteurs...) a été découvert en 1839 par Antoine Becquerel et son fils Alexandre Edmond (père de Henri Becquerel, découvreur de la radioactivité naturelle). Il a été théoriquement compris par Albert Einstein en 1905 à l'aide du concept de photon, particule de lumière, ce qui lui valu le prix Nobel de physique en 1921. L'effet photovoltaïque est un effet photoélectrique apparaissant sous l'incidence de photons sur un semi-conducteur, provoquant l'apparition d'un courant électrique. Il est utilisé dans les panneaux photovoltaïques permettant de produire de l'électricité à partir du rayonnement solaire, dont la première application date de 1956 pour l'alimentation des satellites à l'aide de cellules au silicium. Les centrales photovoltaïques pour la production d'électricité sur les réseaux électriques apparaissent à partir des années quatre-vingt. Elles utilisent des onduleurs¹³ pour convertir le courant continu issu des panneaux en courant alternatif.

Actuellement la puissance installée (on parle de *puissance crête*) des installations peut aller jusqu'à plusieurs centaines de mégawatts.

Le rendement (à savoir le rapport entre l'énergie électrique produite et l'énergie solaire reçue – Eq. 1) d'un panneau solaire photovoltaïque varie entre 6 à 8 % pour les panneaux en silicium amorphe jusqu'à 46 % pour les plus performant en laboratoire. En moyenne, les rendements sont autour de 15 %.

Le facteur de charge (Eq. (2)) moyen des installations photovoltaïques varie de 10 % à 24 % selon la localisation, les valeurs les plus élevées étant atteintes dans des régions très ensoleillées autour des

12. Voir : https://fr.wikipedia.org/wiki/Effet_photo%C3%A9lectrique

13. Un onduleur est un dispositif électronique qui permet de convertir un courant continu en courant alternatif; il est constitué de thyristors, des transistors de puissance, disposés de telle manière que le signal d'entrée est modulé pour obtenir en sorti un signal alternatif de fréquence désirée.

basses latitudes.

En 2017, la production mondiale d'électricité solaire photovoltaïque s'élevait à 443,6 TWh, en augmentation de 35 % par rapport à 2016; elle représentait 1,7 % de la production mondiale d'électricité (source : https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_solaire_photovolt%C3%AFque)

En France, en 2019 (RTE 2019), la production d'électricité d'origine solaire est de 11,6 TWh (hausse de 7,8 % par rapport à l'année précédente). Le facteur de charge annuel¹⁴ est de 14 % (contre 15 % en 2018). La capacité installée est de 9,4 GW.

A.2.2 L'énergie solaire thermique

L'énergie solaire thermique peut être utilisée directement pour chauffer de l'eau, cuire des aliments, etc. Ou bien indirectement, en concentrant le rayonnement solaire à l'aide de miroirs afin de produire de l'électricité de manière classique (chauffage d'un fluide caloporteur – EDF (2012)), auquel cas on parle de solaire thermodynamique. Les technologies utilisées dans les deux cas sont très différentes. Dans le premier, les températures sont dites basse (~ 100 °C), dans le second elles sont hautes (typiquement > 300 °C). Dans le premier cas, l'échelle est généralement individuelle (chauffe-eau solaire, par exemple), dans le second elle est industrielle.

Par exemple, la centrale solaire Thémis dans les Pyrénées est un centre de recherche sur les centrales thermodynamiques¹⁵.

La production¹⁶ des centrales solaires thermodynamiques atteignait 11 TWh en 2017, soit 0,04 % de la production mondiale d'électricité; en comparaison, la production du solaire photovoltaïque s'élevait à 444 TWh (1,7 %), soit 41 fois plus. Les principaux pays producteurs sont l'Espagne : 5,8 TWh (54 %) et les États-Unis : 3,6 TWh (33 %). La puissance installée de ces centrales atteignait 4 845 MW fin 2017 (soit un facteur de charge global d'environ 26 %).

A.2.3 L'énergie éolienne

La puissance cinétique de déplacement des masses d'air sur la planète représente environ 900 TW (Miller et al. 2011) (soit environ 1 % de la puissance solaire incidente au niveau du sol). Ce qui met l'air en mouvement est une différence de température de l'air qui induit une différence de pression, et donc un mouvement d'air pour rétablir l'équilibre. À l'échelle de la planète, l'énergie de rayonnement du Soleil n'est pas répartie de manière identique sur toute la surface de la Terre, la région des Tropiques en reçoit beaucoup plus que celle des pôles. Il y a donc une circulation générale de l'air pour répartir l'énergie solaire entre l'équateur et les pôles¹⁷.

Mais la totalité des 900 TW (ce qui représente quand même 50 fois les besoins de l'humanité), ne peuvent être « extraits ». On montre que seulement 18 à 68 TW pourraient théoriquement être récupérés (Miller et al. 2011). Comme le système Terre est à l'équilibre et que la vitesse des vents n'augmente pas avec le temps, l'énergie cinétique des masses d'air est dissipée. La moitié est dissipée par des frottements au sein de l'atmosphère elle-même, l'autre moitié par des frottements avec la surface des continents et des océans. L'idée est donc de récupérer une partie de l'énergie cinétique *avant* qu'elle ne se dissipe en énergie thermique en la transférant aux pales d'éoliennes. Elle devient de l'énergie mécanique de rotation, qui est à son tour transformée en électricité par l'intermédiaire d'un alternateur. Électricité qui peut ensuite être injectée sur le réseau.

La part de l'électricité éolienne dans la production mondiale atteignait 4,4 % en 2017 et était estimée à 4,7 % en 2018. Les principaux pays producteurs sont la Chine (31 % du total mondial en 2018), les États-Unis (23 %) et l'Allemagne (9 %).

14.

$$f = \frac{11,6 \cdot 10^{12} \times 24 \times 365,25}{9,4 \cdot 10^9} = 0,14$$

15. Voir : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Th%C3%A9mis_\(centrale_solaire\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Th%C3%A9mis_(centrale_solaire)).

16. Source : https://fr.wikipedia.org/wiki/Centrale_solaire_thermodynamique.

17. Voir, par exemple : https://fr.wikipedia.org/wiki/Circulation_atmosph%C3%A9rique.

A.2.4 La biomasse

D'après l'article 19 de la loi du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement¹⁸, « La biomasse est la fraction biodégradable des produits, déchets et résidus provenant de l'agriculture, y compris les substances végétales et animales issues de la terre et de la mer, de la sylviculture et des industries connexes, ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et ménagers. »

L'ensemble de la biomasse sur Terre (figure 14) est estimé à environ 550 Gt de carbone (Bar-On et al. 2018). Les plantes en composent la grande majorité (450 Gt de carbone, soit 82 %), les bactéries viennent juste après avec 70 Gt de carbone (13 %).

Dans les organismes photosynthétiques, la chlorophylle permet d'utiliser l'énergie radiative solaire pour fabriquer des molécules organiques permettant la croissance de la plante. C'est une molécule organique complexe qui permet de récupérer les photons de longueur d'onde adéquate dans le rayonnement pour ensuite, à l'aide d'eau et de dioxyde de carbone, synthétiser les molécules organiques (glucides, comme le glucose) nécessaires à la plante. La chlorophylle absorbe la lumière visible dans toutes les longueurs d'onde entre 400 et 740 nm. Néanmoins la végétation n'absorbe pas parfaitement toutes ces longueurs d'onde, elle reflète environ 10 % de la lumière incidente. Cette lumière a une longueur d'onde essentiellement dans la bande verte (autour de 530 nm), c'est pourquoi la végétation apparaît verte.

La valorisation énergétique de la biomasse peut produire trois formes d'énergie utile, en fonction du type de biomasse et des techniques mises en œuvre :

- de la chaleur;
- de l'électricité;
- une force motrice de déplacement.

On distingue trois procédés d'utilisation de la biomasse : la voie thermochimique (combustion, gazéification, pyrolyse), la méthanisation et la production de biocarburants. La méthanisation permet de produire du gaz par la dégradation de la matière organique par des micro-organismes. La pyrolyse est typiquement la fabrication de charbon de bois. La gazéification est la réaction entre le carbone de la biomasse et des gaz réactants pour produire un gaz combustible.

En moyenne, la biomasse fournit 17 MJ par kilogramme de matière sèche. Comme le flux d'énergie radiative solaire est de $171 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, cela est équivalent à la production de : $10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$. Soit, dans des unités plus « agricoles », $3150 \text{ t} \cdot \text{an}^{-1} \cdot \text{ha}^{-1}$... En comparant à la production effective annuelle de maïs, par exemple, qui varie entre 30 et $60 \text{ t} \cdot \text{an}^{-1} \cdot \text{ha}^{-1}$ (Monteith 1972), on obtient un rendement énergétique d'environ 1 à 2 %.

En 2017 la biomasse fournissait 1 329 Mtep ($5,56 \cdot 10^{19} \text{ J}$) d'énergie, soit 9,5 % environ de l'énergie primaire consommée dans le monde, 481,5 TWh ($1,73 \cdot 10^{18} \text{ J}$) d'électricité, soit 1,9 % de la production mondiale d'électricité.

A.2.5 L'énergie marine

Les mers et océans représentent 71 % de la surface de la planète. Ils reçoivent $1,95 \cdot 10^{24} \text{ J} \cdot \text{an}^{-1} = 5,4 \cdot 10^{17} \text{ kWh}$ de rayonnement solaire sur leur surface. Ils véhiculent donc une grande quantité d'énergie restituée sous forme mécanique (vents, houles, courants), thermique (gradients de température), chimique (gradients de salinité). Quelques exploitations de telles énergies existent, mais elles sont largement minoritaires.

A.2.6 La géothermie

La surface de la Terre reçoit non seulement un flux d'énergie radiative venant du Soleil (environ $171 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$), mais également un flux d'énergie thermique provenant du sous-sol. Ce flux est beaucoup plus faible, environ $0,1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (Davies 2010), provenant pour moitié de la désintégration radioactive

18. Voir : <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexteArticle.do?idArticle=JORFARTI000020949597&cidTexte=JORFTEXT000020949548&categorieLien=id>.

de quatre isotopes à vie longue présents dans la croûte terrestre et le manteau supérieur depuis la formation de la Terre (thorium 232, uranium 238 et 235, potassium 40), et pour moitié de l'énergie de refroidissement de la Terre, issue de sa formation. Une petite partie provient de la cristallisation de la graine (Thomas 2014).

Cette puissance géothermique représente un total de 46 TW sur l'ensemble de la surface de la Terre, dont un tiers par les continents et deux tiers par les océans (Davies 2010).

Le flux n'est pas uniforme sur la surface de la planète, il est maximal au niveau des dorsales océaniques. Même en France, il varie d'un facteur deux entre les régions. Il n'est pas non plus uniforme à l'intérieur de la Terre (sinon, avec un gradient constant de $0,03\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$, on aurait une température de $190\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$ au centre du noyau!).

Il est possible d'exploiter ce flux d'énergie thermique, en creusant plus ou moins profondément. Il est utilisé pour le chauffage ou la production d'électricité. L'énergie thermique est généralement récupérée à l'aide d'un échangeur thermique, qui permet de transférer cette énergie d'un fluide vers un autre sans les mélanger, avec une surface d'échange.

A.2.7 L'électricité hydraulique

Une différence de niveau dans un cours d'eau, naturelle ou bien provoqué (par une retenue, par exemple) permet de transformer l'énergie potentielle de pesanteur en énergie cinétique. L'eau peut ainsi actionner une turbine, son énergie cinétique est alors transformée en énergie cinétique de rotation, qui va elle-même actionner un alternateur synchrone, transformant l'énergie mécanique en énergie électrique (Lavy 2004).

La France possède un potentiel hydroélectrique important grâce à la présence de massifs montagneux sur son territoire, et d'un réseau électrique performant pour transporter l'électricité depuis le lieu de production jusqu'aux consommateurs, distants. Le potentiel hydroélectrique est déjà exploité en très grande partie.

La puissance actuellement (2019) installée est de 25,5 GW (soit environ dix fois moins que la Chine). La production en 2018 (RTE 2018b) est de 63,1 TWh = 5,4 Mtep (le barrage des Trois Gorges¹⁹ en Chine produit 85 TWh par an), ce qui représente 14 % de la consommation finale d'électricité pour cette année-là²⁰.

Les principaux types de centrales sont les centrales au fil de l'eau, sans réservoir, et les centrales réservoirs qui sont dotées d'un réservoir.

Les centrales au fil de l'eau la turbinent au fur et à mesure sans la retenir, assurant une production continue d'électricité. La puissance installée est d'environ 7,6 GW (soit 30 % du parc), répartie sur plus de 2000 installations, la production représente 54 % de la production hydroélectrique française.

Les centrales réservoirs disposent d'une retenue permettant de stocker l'eau pour la turbiner en fonction de la demande. On distingue les centrales de lac et les centrales d'écluse selon la taille de réservoir. La puissance installée est de 13 GW, répartie dans une centaines de centrales de lac et 140 centrales d'écluse. La production annuelle représente 46 % de la production hydroélectrique française. Ce type de centrale est crucial pour assurer la stabilité du réseau électrique. Il permet en effet l'ajustement de la production aux pics de consommation ou bien en cas d'incident sur le réseau. Cette puissance est mobilisable en quelques minutes²¹, ce qui explique qu'une centrale comme celle de Serre-Ponçon n'a un facteur de charge que de 21 % : elle ne fonctionne pas en permanence.

Les reste de la puissance installée (4,9 GW) est constitué de stations de transfert d'énergie par pompage (STEP – section 3.3).

La puissance installée en 2019 est de 25,6 GW (RTE 2019) ce qui représente 19 % de l'ensemble des centrales électriques de France. La production hydroélectrique a totalisé 60 TWh soit 11,2 % de la

19. https://fr.wikipedia.org/wiki/Barrage_des_Trois-Gorges.

20. La production d'électricité hydraulique est en partie dépendante de la pluviométrie. Ainsi, l'année 2017 plus sèche en moyenne, avait produit 30 % de moins (RTE 2018b)

21. Une centrale thermique à gaz nécessite 7 à 11 h pour passer de l'arrêt à la pleine puissance, mais en fonctionnement elle est capable de moduler sa production pour suivre les variations de l'éolien, par exemple. De même il faut environ 40 h à une centrale nucléaire pour passer de l'arrêt à la pleine puissance (ENR 2012), mais lorsqu'elle est en fonctionnement on peut moduler jusqu'à 80 % de sa puissance en moins de 30 min. Les arrêts de centrales nucléaires n'ont lieu qu'environ une fois par an.

production électrique totale. Le potentiel accessible est déjà bien exploité, donc en France, et même en Europe, le développement de l'énergie hydroélectrique est limité.

En 2018, la puissance installée des centrales hydroélectriques atteint 1 292 GW dans le monde, produisant environ 4 200 TWh par an, soit 70 % de la production mondiale d'énergie renouvelable et 15,8 % de la production mondiale d'électricité.

B Mix électrique en temps réel

Il est possible de regarder en temps réel la consommation et la production d'électricité en France sur le site : <https://www.rte-france.com/eco2mix>. Par exemple, la figure 15 montre la production journalière d'électricité, pour chaque filière, par pas temporels de 15 minutes, pour la journée du jeudi 25 avril 2019. Le maximum de production est à 11 h 00 (66 GW), tandis que le minimum est à 4 h (55 GW). La consommation (ou puissance appelée) est au-dessus de la ligne horizontale, le surplus produit (sous la ligne horizontale) est exporté ou utilisé pour du stockage par pompage.

L'écart de consommation entre le minimum et le maximum, par rapport à une valeur moyenne journalière est d'environ $\pm 10\%$. Dans ce cas précis ce sont les centrales nucléaires et hydrauliques qui sont mises à contribution. Sur une autre journée, hivernale, celle du jeudi 24 janvier 2019 (figure 16), le maximum de la consommation est atteint vers 19 h, avec une mise à contribution de l'électricité hydraulique (facteur 3,3 en plus par rapport au minimum), à laquelle s'ajoutent des importations.

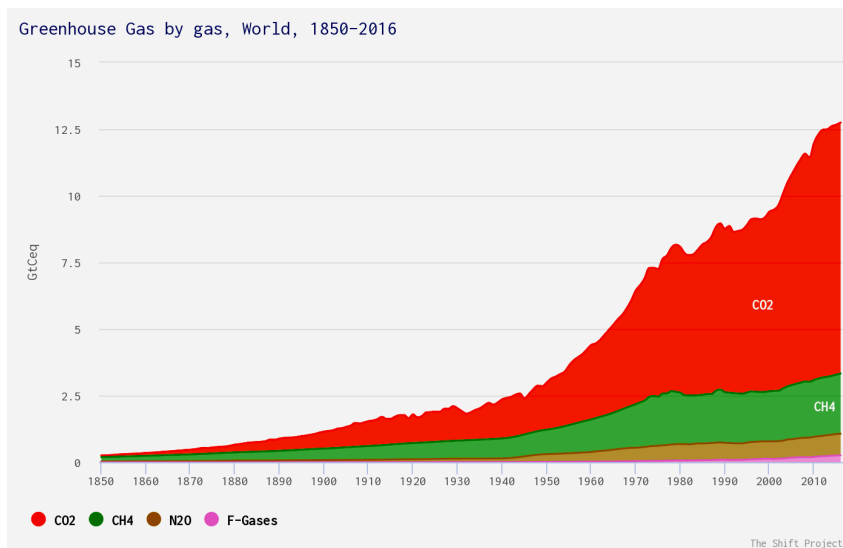
Références

- ADEME (2014), Base Carbone - Documentation Des Facteurs d'émission de La Base Carbone, URL [https://www.bilans-ges.ademe.fr/static/documents/\[Base%20Carbone\]%20Documentation%20g%C3%A9n%C3%A9rale%20v11.0.pdf](https://www.bilans-ges.ademe.fr/static/documents/[Base%20Carbone]%20Documentation%20g%C3%A9n%C3%A9rale%20v11.0.pdf).
- ADEME (2018), Qu'est-ce que l'ACV?, URL <https://www.ademe.fr/expertises/consommer-autrement/passer-a-l'action/dossier/lanalyse-cycle-vie/quest-lacv>.
- Bar-On Y.M., Phillips R. & Milo R. (2018), The Biomass Distribution on Earth, Proceedings of the National Academy of Sciences, **115**(25), pp. 6506–6511, ISSN 0027-8424, URL <https://www.pnas.org/content/115/25/6506>.
- Blanc G. & Noûs C., Physique et Enjeux de Société (OPUS | Université Paris Cité 2023), URL <https://opus.u-paris.fr/catalog/download/5/19/1252>.
- Bornard P, Pavard M. & Testud G. (2005), Réseaux d'interconnexion et de Transport : Fonctionnement, Techniques de l'ingénieur.
- Bouneau S. (2018a), Comment Comprendre La Transition Énergétique ?, in Conférence Au LPS, Orsay (2018a).
- Bouneau S. (2018b), Quelles Sources d'énergie Pour Répondre Aux Besoins Futurs ?, in EcoClim 2018 (2018b), URL <http://www.th.u-psud.fr/ECOCLIM2018/>.
- BP (2018), BP Statistical Review of World Energy, Technical report, BP, URL <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>.
- BP (2019), BP Statistical Review of World Energy, URL <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2019-full-report.pdf>.
- CITEPA (2019), Gaz à Effet de Serre et Polluants Atmosphériques - Bilan Des Émissions En France de 1990 à 2017, Technical report, URL <https://www.citepa.org/fr/secten/>.
- Davies J. (2010), Earth's Surface Heat Flux, Solid Earth, (1).
- DOE (2020), Global Energy Storage Database | Energy Storage Systems, URL <https://www.sandia.gov/ess-ssl/global-energy-storage-database-home/>.
- EDF (2012), Le Solaire Thermodynamique à Concentration, URL https://www.edf.fr/sites/default/files/contrib/groupe-edf/producteur-industriel/thermique/enjeux/modernisation-du-parc/le_solaire_thermodynamique_a_concentration.pdf.

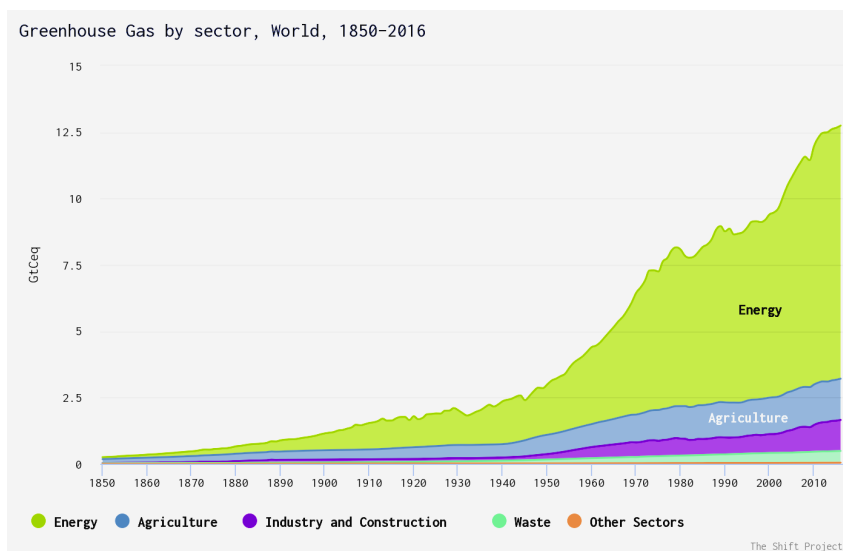
- ENR (2012), L'hydroélectricité : Les Chiffres En France et Dans Le Monde.
- Friedlingstein P., Jones M.W., O'Sullivan M., Andrew R.M., Hauck J., Peters G.P., Peters W., Pongratz J., Sitch S., Le Quéré C., Bakker D.C.E., Canadell J.G., Ciais P., Jackson R.B., Anthoni P. et al. (2019), Global Carbon Budget 2019, Earth System Science Data, **11**(4), pp. 1783–1838, ISSN 1866-3516, URL <https://www.earth-syst-sci-data.net/11/1783/2019/>.
- Hall C.A., Lambert J.G. & Balogh S.B. (2014), EROI of Different Fuels and the Implications for Society, Energy Policy, **64**, pp. 141–152, ISSN 03014215, URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421513003856>.
- IPCC (2006), 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories - Volume 1 - General Guidance and Reporting, Technical report, URL https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/1_Volume1/V1_1_Ch1_Introduction.pdf.
- Krakowski V. (2016), Intégration Du Renouvelable et Stratégie de Déploiement Du Réseau Électrique : Réconciliation d'échelles Spatio-Temporelles Dans Des Exercices Prospectifs de Long Terme, Ph.D. thesis, Université de recherche Paris Sciences et Lettres, URL <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-01557528v2>.
- Lavy P. (2004), Production d'électricité par aménagements hydrauliques, Techniques de l'ingénieur, p. 25.
- Miller L.M., Gans F. & Kleidon A. (2011), Estimating Maximum Global Land Surface Wind Power Extractability and Associated Climatic Consequences, Earth System Dynamics, pp. 1–12, ISSN 2190-4987, URL <https://www.earth-syst-dynam.net/2/1/2011/>.
- Monteith J.L. (1972), Solar Radiation and Productivity in Tropical Ecosystems, The Journal of Applied Ecology, **9**(3), p. 747, ISSN 00218901, URL <https://www.jstor.org/stable/2401901?origin=crossref,2401901>.
- Ngô C. (2016), Stockage de l'énergie, Techniques de l'ingénieur.
- OIE (2020), Primaire Ou Finale : Comment Comptabiliser l'énergie ?, Observatoire de l'Industrie Électrique, URL https://observatoire-electricite.fr/IMG/pdf/fiche_pedago_primaire_ou_finale_-_coment_comptabiliser_l_energie_-_mars_2020.pdf.
- RTE (2016), Bilan électrique 2016, Technical report, Réseau de Transport d'Électricité, URL https://www.rte-france.com/sites/default/files/bilan_electrique_2016.pdf.
- RTE (2017), Bilan électrique 2017, Technical report, Réseau de Transport d'Électricité, URL https://www.rte-france.com/sites/default/files/bilan_electrique_2017.pdf.
- RTE (2018a), Bilan Électrique 2018, Technical report, Réseau de Transport d'Électricité, URL https://www.rte-france.com/sites/default/files/be_pdf_2018v3.pdf.
- RTE (2018b), Panorama de l'électricité Renouvelable Au 31 Decembre 2018, Technical report, URL https://assets.rte-france.com/prod/public/2020-06/Panorama%20de%201%27%C3%A9lectricit%C3%A9%20renouvelable%20au%2031%20decembre%202018_compressed.pdf.
- RTE (2019), Bilan Électrique 2019, Technical report, Réseau de Transport d'Électricité, URL <https://bilan-electrique-2019.rte-france.com/>.
- Sapy G. (2019), Les énergies renouvelables intermittentes mettent-elles en cause la stabilité des réseaux?, Science et pseudo-sciences, (329), URL <https://www.afis.org/Les-energies-renouvelables-intermittentes-mettent-elles-en-cause-la-stabilite>.
- SDES (2021), Chiffres clés du climat - France, Europe et Monde - Édition 2021, Technical report, URL https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2020-12/datalab_81_chiffres_cles_du_climat_edition_2021.pdf.
- Thomas P. (2014), La Chaleur de La Terre et La Géothermie, URL <https://planet-terre.ens-lyon.fr/article/chaleur-Terre-geothermie.xml>.
- Treiner J. (2016), Le taux de retour énergétique, une mesure de l'efficacité sociétale des sources d'énergie, URL <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/chronique-retour-energetique-39038/>.

Treiner J. (2018), Énergies de Stock, Énergies de Flux, Reflets de la physique, **112**.

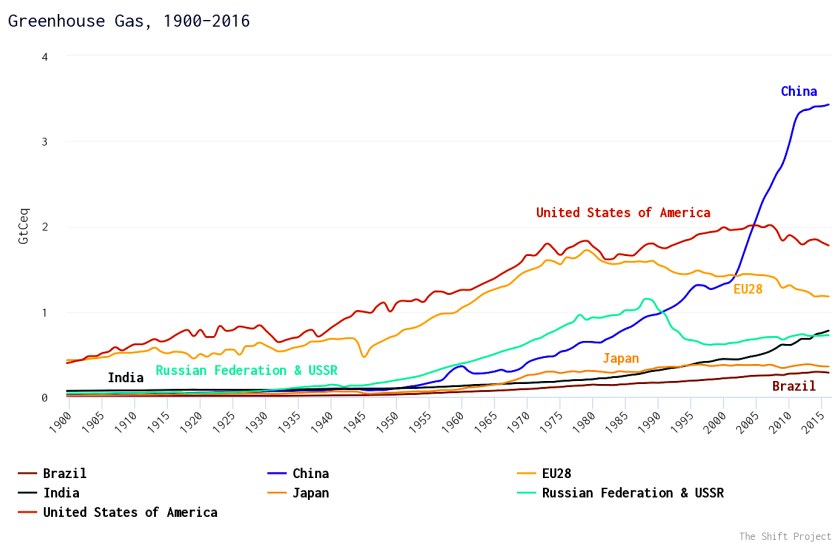
Valentin L., L'univers Mécanique, Introduction à La Physique et à Ses Méthodes (Hermann 1995).



(a) Évolution des émissions annuelles mondiales de gaz à effet de serre par type de gaz.



(b) Évolution des émissions annuelles mondiales de gaz à effet de serre par secteur d'émission.



(c) Évolution des émissions annuelles de gaz à effet de serre pour les principales régions émettrices.

FIGURE 13 – Évolution des émissions annuelles de gaz à effet de serre en GtC/an. Tiré de <https://theshiftdataportal.org>.

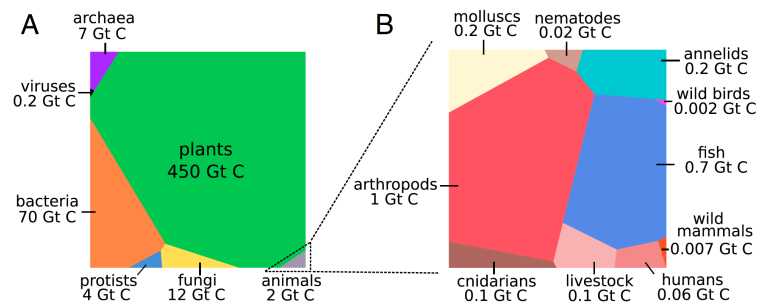


FIGURE 14 – Représentation graphique de la distribution globale de la biomasse sur Terre, par groupes taxonomiques d’êtres vivants. L’aire de chaque polygone est proportionnelle à la masse correspondante du groupe. Le « livestock » représente les animaux d’élevage. Source : Bar-On et al. (2018).

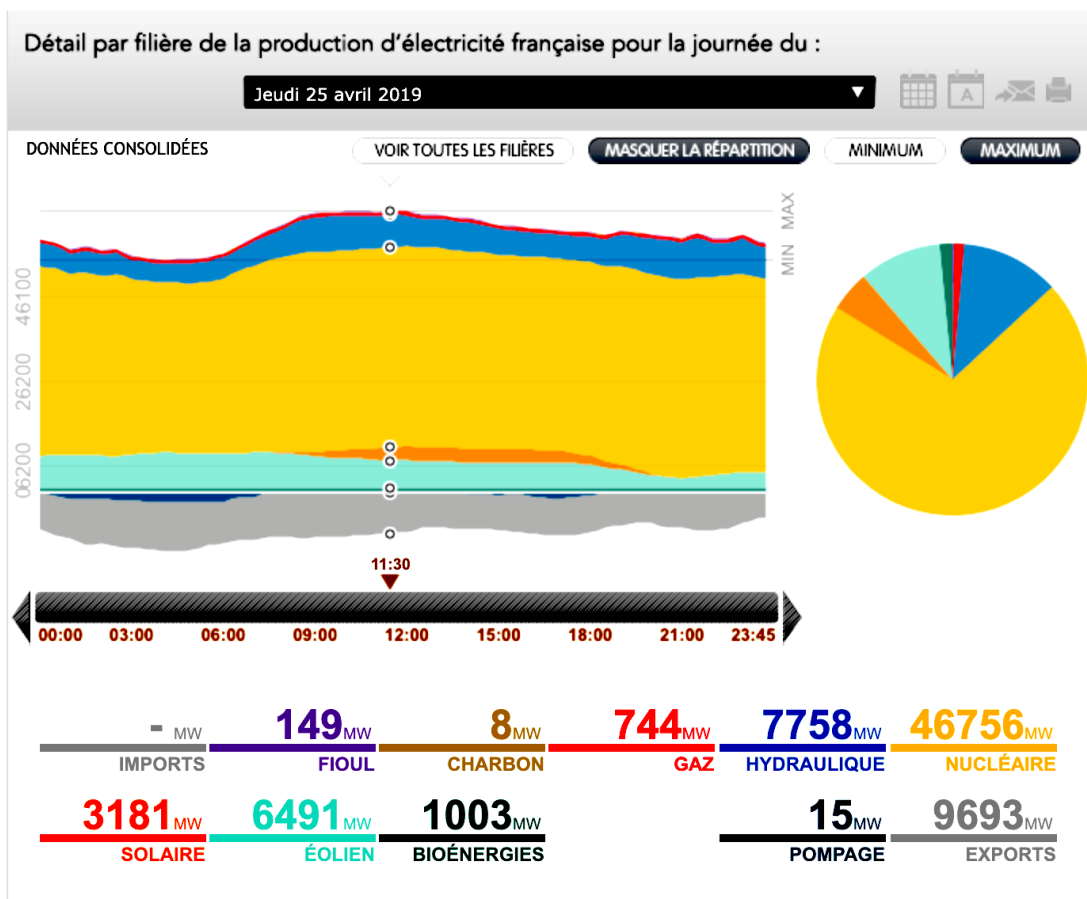


FIGURE 15 – Détail par filière de la production d’électricité en France le jeudi 25 avril 2019. Le curseur est sur le maximum de production instantané à 11 h 30. Le minimum est à 4 h 00. Copie d’écran du site : <https://www.rte-france.com/eco2mix>.

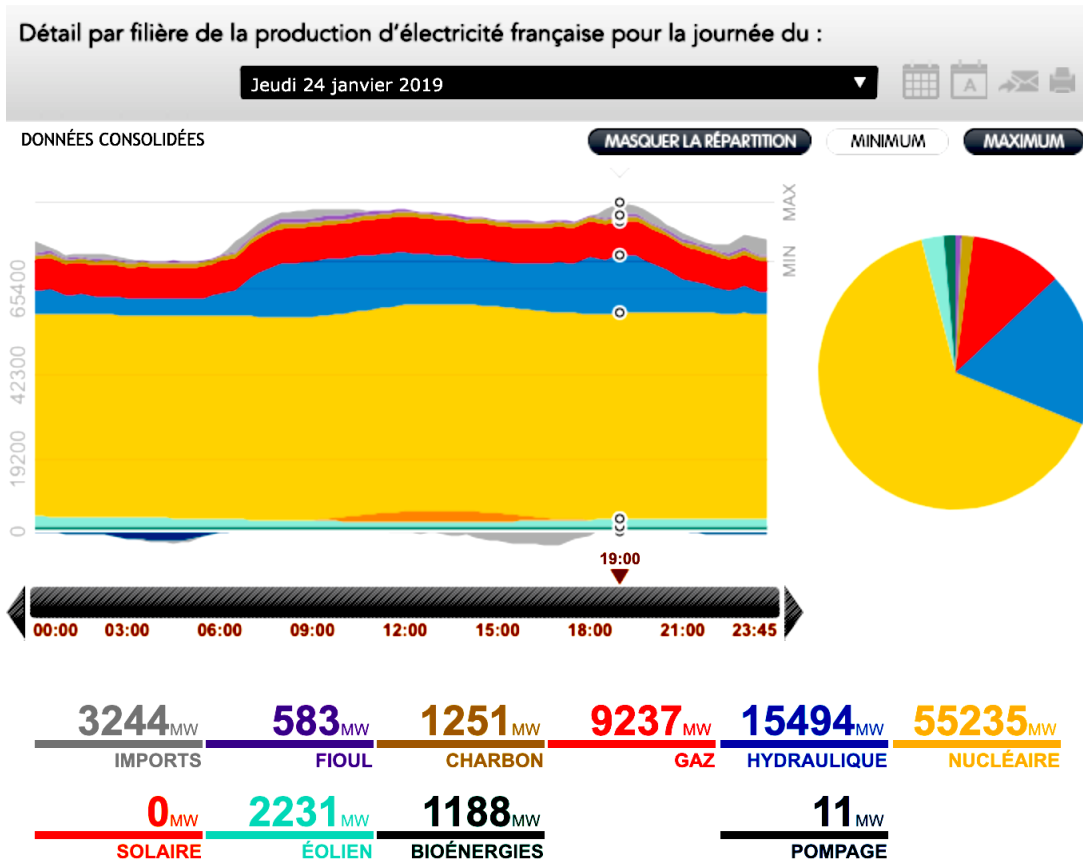


FIGURE 16 – Détail par filière de la production d'électricité en France le jeudi 24 janvier 2019. Le curseur est sur le maximum de production instantané à 19 h. Le minimum est à 5 h 00. Copie d'écran du site : <https://www.rte-france.com/eco2mix>.