

Bernard Multon est Professeur des Universités au département de Mécatronique de l'ENS Rennes [1] et chercheur dans le groupe SETE du pôle CSEE du laboratoire SATIE [2].

Cette ressource pédagogique est principalement basée sur la conférence « Efficacité énergétique : aspects physiques et technologies de la conversion d'énergie » [3] dispensée par Bernard Multon lors de la 6<sup>ème</sup> Ecole Energies et Recherches [4].

L'énergie est un élément fondamental de nos sociétés, elle est extraite de ressources primaires, transportées, transformées, stockées... Depuis l'aube de l'humanité, les ressources primaires exploitées ont été le bois, puis les fossiles (charbon, pétrole, gaz), transformées via des combustions et, plus récemment, l'uranium à travers la fission nucléaire ; l'énergie mécanique des cours d'eau et du vent a également été mise à contribution. Des transformations stellaires aux transformations d'énergie terrestres : les conversions d'énergie sont au cœur de nos vies (figure 1).

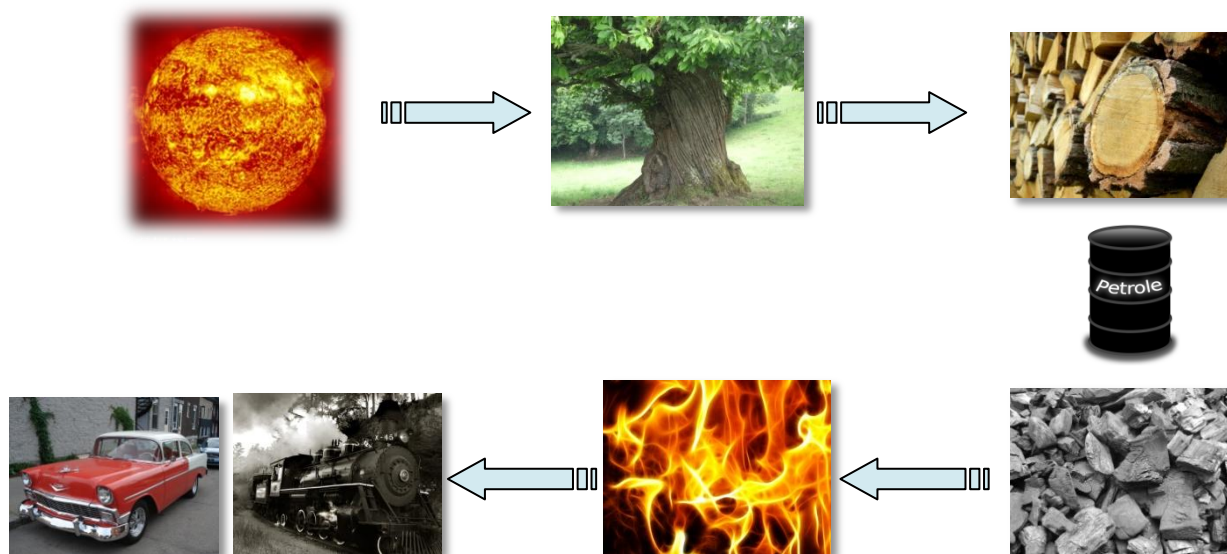


Figure 1 : Exemple de transformations et conversions :

Le stock d'hydrogène stellaire permet la fusion nucléaire d'hydrogène dans les étoiles. Le rayonnement chemine dans l'espace jusqu'à la terre, engendrant la photosynthèse de molécules organiques qui génère la biomasse et les hydrocarbures fossiles, dont les stocks se sont constitués lentement et sur des temps géologiques. La combustion de la biomasse ou des hydrocarbures fossiles provoque par réaction chimique un dégagement de chaleur qui peut être transformé en énergie mécanique. Ce rayonnement peut être converti en énergie électrique par effet photovoltaïque, ou encore en énergie mécanique hydraulique via les cycles d'évaporation et de condensation de l'eau.

En à peine plus d'un siècle, l'électricité, forme moderne de l'énergie par excellence, a pris une place de premier plan. Sa production absorbe désormais plus du tiers de la consommation d'énergie primaire mondiale. La combustion à grande échelle des carburants fossiles conduit à des dégagements massifs de gaz à effet de serre qui modifient les équilibres du système

climatique ; par ailleurs, si leurs ressources restent extrêmement abondantes, au point de causer des dégâts environnementaux incommensurables, elles finiront par s'épuiser. Les déchets nucléaires, produits de l'extraction de l'uranium jusqu'au démantèlement des centrales, ont des durées de vie souvent extrêmement longues et s'accumulent dangereusement.

Parallèlement, la nature nous dispense, de façon assez bien répartie sur la terre, une quantité d'énergie renouvelable plus que suffisante pour satisfaire nos besoins ; en effet la ressource solaire et ses sous-produits (vent, hydraulique...) représentent environ 8000 fois la consommation annuelle d'énergie primaire de l'humanité.

Cette ressource pédagogique aborde les conversions d'énergie, la problématique de l'efficacité énergétique, les possibilités et limites des conversions. Les notions de rendement instantané et rendement sur cycle sont formalisées, puis celle de rendement sur cycle de vie est introduite en incluant des notions de soutenabilité ; la gestion des conversions, le juste dimensionnement des convertisseurs et des usages sont abordés, quelques exemples sont alors développés (éclairage, bâtiments, transports...).

## 1 – Rendement énergétique et efficacité énergétique

En physique, l'énergie est une grandeur unifiée qui permet de quantifier diverses transformations d'un système. Elle se manifeste sous forme de chaleur, de travail mécanique se traduisant par une mise en mouvement, de rayonnement électromagnétique, de transformations chimiques (à l'échelle moléculaire) ou nucléaires (à l'échelle des noyaux atomiques).

D'un point de vue physique, l'énergie ne se produit pas, ni se consomme, elle se transforme ou se convertit d'une forme en une autre. Assurer un service (déplacement, éclairage, chauffage...), nécessite des transformations, donc une dépense d'énergie. L'énergie est transformée par un convertisseur d'énergie qui dépend du service à réaliser ; un convertisseur peut être un moteur électrique ou thermique, une lampe ou une chaudière...

Le rendement énergétique est le rapport entre deux quantités, l'énergie « produite », c'est-à-dire l'énergie utile pour réaliser un service, sur l'énergie « consommée », c'est-à-dire l'énergie absorbée pour réaliser ce service.

L'efficacité énergétique est la quantification de la « consommation » d'énergie pour assurer un service, avec l'idée de la minimiser grâce à des technologies plus efficaces.

Dans la plupart des cas, les services convertissent de l'énergie finale, qui est une forme d'énergie commercialisée et directement consommable. L'énergie finale est transformée à partir de ressources primaires (figure 2).

Les ressources énergétiques primaires sont disponibles à l'état brut dans la nature, on peut les classer en deux catégories, celles de stocks non renouvelables (fossiles et fissiles) et celles de flux renouvelables. Les formes d'énergie finale sont directement utilisables dans les convertisseurs. L'énergie utile correspond quant à elle aux services énergétiques attendus.

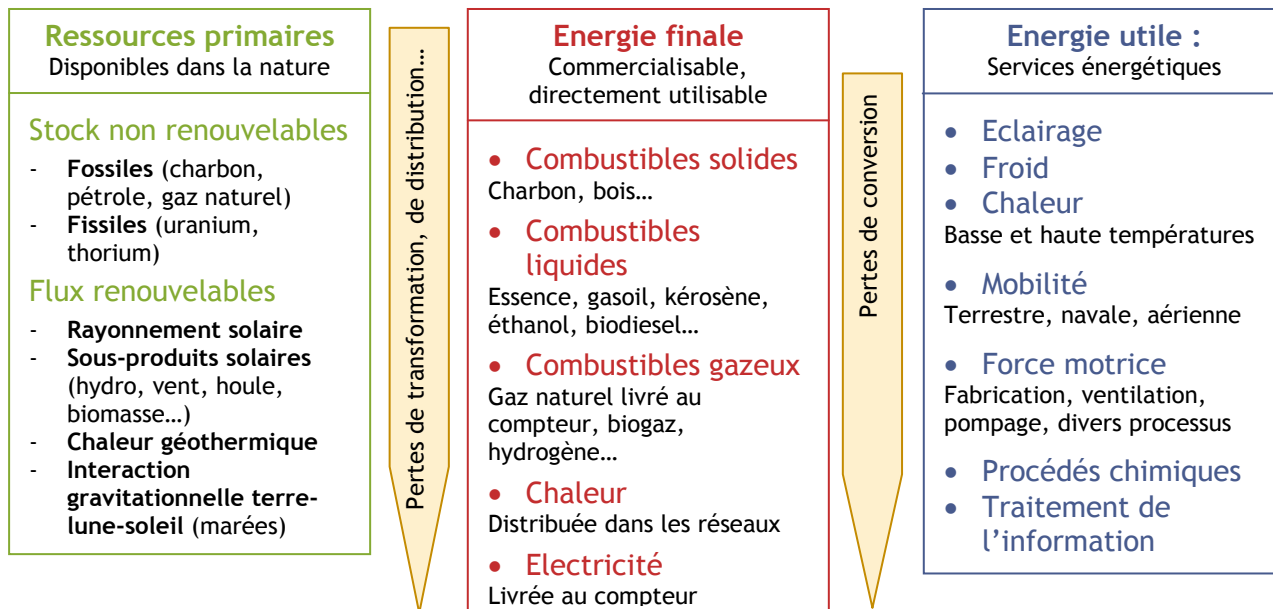


Figure 2 : Des ressources primaires aux services énergétiques, image B. Multon

On parle souvent de *producteurs d'énergie* (sous entendue finale) et de *consommateurs d'énergie* finale. Il s'agit d'une vision consumériste des conversions énergétiques mais dans tous les cas, il s'agit bien de **transformations énergétiques**.

Cependant, il semble pertinent de distinguer l'efficacité selon deux points de vue :

- La production d'énergie finale à partir de ressources primaires,
- La consommation d'énergie finale pour la transformer en service.

Au sein de ces procédés, se trouvent plusieurs convertisseurs d'énergie. Par exemple, produire de l'électricité à partir de combustibles non renouvelables (fossiles ou fissiles) nécessite :

- Une extraction minière avec des machines équipées de *moteurs* qui consomment de l'énergie finale (hydrocarbures liquides, électricité...),
- Des transformations des minerais en matières premières (acier, cuivre, terres rares...) par des procédés industriels exploitants également divers *convertisseurs*,
- Les transports et raffinage pour obtenir le combustible de qualité souhaitée,
- Enfin une conversion finale du combustible en électricité à l'aide de *brûleurs, turbines, générateurs, transformateurs...* tous des convertisseurs d'énergie.

Le service associé à des kilomètres parcourus avec une automobile nécessite également nombre de convertisseurs d'énergie. Tout d'abord pour fabriquer le véhicule depuis l'extraction des matières premières jusqu'à son recyclage en fin de vie. Puis, lors de son utilisation où l'énergie finale est consommée via le *moteur* en fonction de la taille du véhicule et de la conduite de son chauffeur.

Les questions de rendement énergétique des convertisseurs sont ainsi centrales lorsque l'on parle d'efficacité énergétique.

## 2 – L'énergie

### 2.1 - Unités et équivalence

L'unité de l'énergie dans le Système International est le Joule<sup>1</sup> [J]. Les factures d'électricité sont quantifiées en kilowattheure [kWh] ; pour les carburants, on parle plutôt de tonnes équivalent pétrole [tep]. Dans le tableau ci-dessous, quelques unités et leurs équivalences sont présentées.

nom	unité	équivalence
Energie mécanique	J	1 J = 1 N.m
Energie électrique	J	1J = 1V.1A.1s = 1V.6,2.10 <sup>18</sup> électrons
électron-volt (particule)	eV	1 eV = 1,6.10 <sup>-19</sup> J
Unités de chaleur : calorie british thermal unit quadrillon BTU (US)	Cal BTU quadBTU	1 cal = 4,18 J 1 BTU = 1050 J 1 quadBTU = 10 <sup>15</sup> BTU
kilowattheure	kWh	1 kWh = 3600 000 J = 3,6.10 <sup>6</sup> J = 3,6 MJ
térawattheure	TWh	1 TWh = 10 <sup>12</sup> Wh = 10 <sup>9</sup> kWh
tonne équivalent pétrole	tep	1 tep ≈ 11 600 kWh ≈ 41,7 GJ
baril (159 l ou 140 kg)		1 baril ≈ 1700 kWh

Figure 3 : L'énergie, unités et équivalence

### 2.2 - Quelques exemples de conversions d'énergie

La calorie (4,18 J) est la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1°C, 1g d'eau. Il faut donc 4180 J pour accroître d'un degré Celsius<sup>2</sup> 1 kilogramme d'eau :  $E = c.M.\Delta T$ , avec  $E$  l'énergie [J],  $c$  la capacité thermique massique [4180 J/kg/°C],  $M$  la masse [kg] et  $\Delta T$  la différence de température [°C].

La combustion d'un mètre cube de méthane (dans les conditions normales de température et de pression) dégage environ 40 MJ par modifications des liaisons moléculaires, il s'agit là d'une conversion énergétique chimique.

Selon la célèbre formule  $E = m.c^2$ , la désintégration complète d'un gramme de matière libérerait 90 000 GJ d'énergie (avec  $m = 10^{-3}$  kg et  $c = 3.10^8$  m/s). La fusion d'un gramme de deutérium-tritium libère 340 GJ par modification des liaisons atomique des noyaux ; la fission d'un gramme d'uranium naturel libère 400 MJ. Dans ces trois exemples, on parle d'énergie nucléaire.

Le rayonnement électromagnétique du soleil à la surface de la terre, permet à une surface noire de 4 m<sup>2</sup>, de capter en une seconde 4000 J (flux solaire terrestre de 1kW/m<sup>2</sup>). 4000 J correspondent également à l'énergie nécessaire pour élever de 4 mètres un poids de 1000 N (soit une masse de 100 kg dans un champ de pesanteur égal à 10 m/s<sup>2</sup>) :  $E = P.d$ . Enfin, un courant de 1A sous une tension de 1,2 V (soit un élément de batterie plomb acide) et durant 3300 s (55 min), convertit 4000 J :  $E = U.I.t$ .

Des lois idéales de l'énergétique permettraient de réaliser toutes ces transformations d'une forme à l'autre, cependant certaines sont possibles et d'autres pas...

<sup>1</sup> Du nom de James Prescott Joule (1818-1889), physicien anglais.

<sup>2</sup> Du nom d'Anders Celsius (1701-1744), savant suédois.

### 3 – La puissance

La puissance est le débit d'énergie qui a lieu lors d'une conversion,  $P = \frac{dE}{dt}$  avec  $P$  la puissance en watt<sup>3</sup> [W ou kW],  $E$  l'énergie [J ou kWh] et  $t$  le temps [s ou h].

Si l'énergie caractérise le service énergétique rendu (travail, éclairage, ...), la puissance, quant à elle, caractérise le convertisseur d'énergie et plus particulièrement sa capacité à transformer plus ou moins vite l'énergie. Ainsi un moteur électrique de 20 kW transforme une même quantité d'énergie électrique deux fois plus rapidement qu'un moteur de 10 kW, il convertit deux fois plus vite l'énergie électrique qu'il reçoit en énergie mécanique et effectue donc un même travail plus rapidement. Obtenir 10 kWh de chaleur sous un rayonnement solaire de 1 kW/m<sup>2</sup>, dépend de la puissance du capteur solaire : 1 m<sup>2</sup> de capteur solaire idéal (1 kW) demandera 10 heures, et en augmentant la surface donc la puissance, 5 m<sup>2</sup> de capteur ne nécessiteraient plus que deux heures dans les mêmes conditions.

Une transformation énergétique plus rapide nécessite un convertisseur plus puissant, donc plus cher, requérant plus de matières premières et consommant donc plus d'énergie grise, celle nécessaire à sa fabrication. En outre, vouloir réaliser plus rapidement un service énergétique requiert plus d'« énergie utile », par exemple : sur un trajet de 100 km une automobile dont la résistance à l'avancement serait de 400 N à 100 km/h consommerait une énergie de 40 MJ (soit  $400 \cdot 100 \cdot 10^3$  J) et une puissance mécanique de 11 kW (11 kWh en 1 heure) ; ce même déplacement à 130 km/h conduirait à une résistance à l'avancement de 650 N et requerrait 65 MJ et 23,5 kW (soit 18 kWh en 0,77 h).

Augmenter la rapidité d'une conversion consomme plus d'énergie utile (parfois de façon moins sensible que dans l'exemple précédent), et nécessite un convertisseur d'énergie encore plus puissant que ce que l'on aurait pu imaginer, donc nécessitant encore plus de matériaux et d'énergie grise.

### 4 – Conversions d'énergie, possibilités et limites

D'un point de vue physique, l'énergie ne se produit pas, ni se consomme, elle se transforme ou se convertit d'une forme en une autre : le carburant se convertit en chaleur par combustion ou en énergie mécanique via un moteur à combustion, le rayonnement solaire est transformé en électricité par un système photovoltaïque... Lors d'une transformation ou d'une conversion, toute l'énergie entrante n'est pas extraite en énergie de sortie (souhaitée ou utile), une partie est « perdue » sous forme de chaleur dispersée dans l'environnement ; le rendement, rapport de l'énergie sortante sur l'énergie entrante, est donc inférieur à 100%. L'évacuation des pertes vers l'environnement nécessite un système de refroidissement, un échangeur de chaleur.

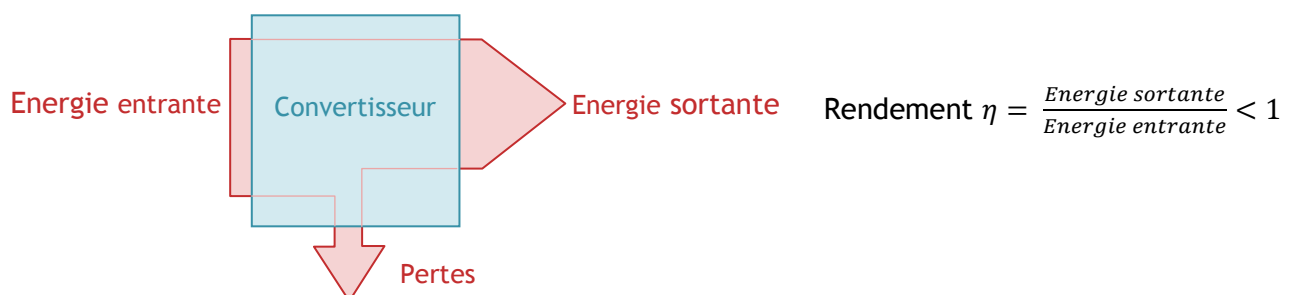


Figure 4 : Conversion d'énergie et rendement

<sup>3</sup> Du nom de James Watt (1736-1819), ingénieur écossais

## 4.1 - Conversion en chaleur

Obtenir de la chaleur par combustion consiste en une réaction chimique exothermique dont l'énergie développée dépend du combustible. Deux valeurs énergétiques des combustibles [kWh/kg] sont définies :

- Le pouvoir calorique inférieur,  $PCI$ ,
- Le pouvoir calorique supérieur,  $PCS$ , qui inclut, par rapport au  $PCI$ , la récupération de la chaleur latente de condensation des fumées. Il est supérieur de 3 à 10% au  $PCI$ .

Les valeurs typiques sont de 4 kWh<sub>PCI</sub>/kg pour le bois sec à 39 kWh<sub>PCS</sub>/kg pour l'hydrogène en passant par 12 kWh<sub>PCI</sub>/kg pour les hydrocarbures liquides. Sans autres précisions, le rendement d'une chaudière à combustion est généralement calculé sur la base du  $PCI$ , ce qui peut amener à des valeurs de rendement supérieures à 100% dans le cas des chaudières dites à condensation.

Lorsque les combustibles sont carbonés, leur combustion génère des émissions de gaz à effet de serre (GES). Le dégagement de CO<sub>2</sub> (3,7 kg CO<sub>2</sub> par kilogramme de carbone) peut aller de 0,2 kg CO<sub>2</sub>/kWh<sub>PCI</sub> pour le méthane à 0,35 kg CO<sub>2</sub>/kWh<sub>PCI</sub> pour le charbon.

Produire de la chaleur par fission nucléaire, par cassure de noyaux fissiles comme l'uranium 235 génère environ 120 000 kWh.kgU<sub>nat</sub>.

Toutes les formes d'énergie (mécanique, électrique, ...) peuvent aisément être « dégradées » en chaleur par frottements (effet Joule en électricité).

Dans ces conversions, la quasi-totalité de la chaleur peut être récupérée à l'aide d'échangeurs performants. Ainsi il est possible de parler d'un rendement théorique de conversion en chaleur de 100 %.

## 4.2 - Conversion en énergie à haute valeur

Partant d'une source de chaleur (combustion, rayonnement solaire, ...), il y a une limite thermodynamique (principe de Carnot<sup>4</sup> ou second principe de la thermodynamique) :

$$\eta_{Carnot} = \left[ \frac{W}{Q} \right]_{Lim} = \frac{T_{chaud} - T_{froid}}{T_{chaud}}, \text{ avec } W \text{ le travail mécanique, } Q \text{ la chaleur prise à une source, et } T \text{ les températures des sources chaude et froide (environnement) en Kelvins}^5 \text{ [K].}$$

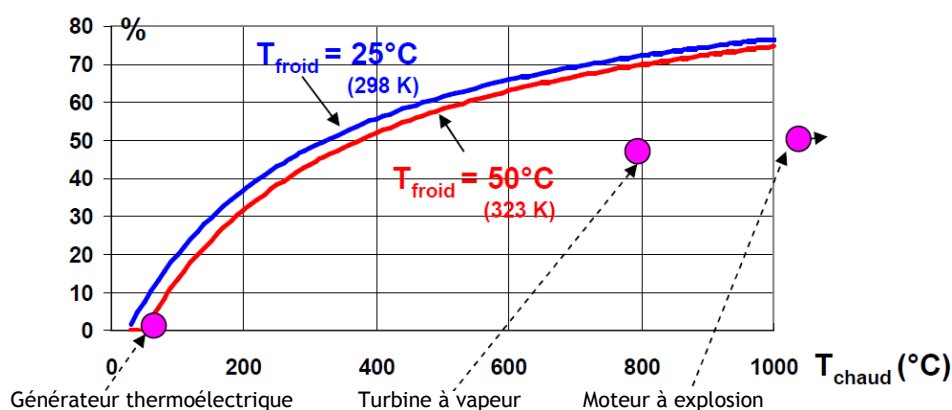


Figure 5 : Limites thermodynamiques et valeurs réelles du rendement de quelques machines thermodynamiques, image B. Multon

<sup>4</sup> Du nom de Sadi Carnot (1796-1832), physicien français.

<sup>5</sup> Du nom de William Thomson lord Kelvin (1824-1907), physicien britannique.



Ainsi que le montre la figure 5, les rendements des machines thermodynamiques comme les moteurs à combustion, les turbines à vapeur, les systèmes photovoltaïques et thermoélectriques (...) sont toujours inférieurs à la limite de Carnot.

### 4.3 - Pompes à chaleur et systèmes frigorifiques

Ce sont des machines thermodynamiques inversées qui, au lieu de convertir de la chaleur en énergie mécanique comme le font les moteurs, convertissent de l'énergie mécanique en chaleur : une pompe à chaleur prélève la chaleur dans l'environnement en augmentant sa température, et un système frigorifique rejette la chaleur, extraite d'une chambre froide, dans l'environnement (figure 6).

La performance d'une pompe à chaleur, basée sur le second principe de la thermodynamique et en particulier sur la température des sources primaires et secondaires, est caractérisée par son coefficient de performance ou COP, ratio de l'énergie « produite » sur l'énergie « consommée ».

Le coefficient de performance est défini lors de la production de froid par :  $COP = \frac{Q_{absorbée}}{E_{mécanique}}$  et lors de la récupération de chaleur dans l'environnement (pompes à chaleur) par :  $COP = \frac{Q_{fournie}}{E_{mécanique}}$

Le COP maximum et idéal que l'on pourrait atteindre dépend de la température de la source secondaire sur la différence de température entre les deux sources. Il est appelé COP de Carnot (voir [5]) :

$$COP_{Carnot} = \frac{T_{chaud}}{(T_{chaud} - T_{froid})} \quad (\text{pompes à chaleur})$$

$$COP_{Carnot} = \frac{T_{froid}}{(T_{chaud} - T_{froid})} \quad (\text{systèmes frigorifiques})$$

En pratique, le COP réel est toujours inférieur à la limite théorique ou COP de Carnot ; en effet les performances des échangeurs thermiques ne permettent pas de faire en sorte que les températures des sources réelles soient égales à celles de la machine de Carnot idéale, mais également à cause des imperfections des machines et du fluide de travail.

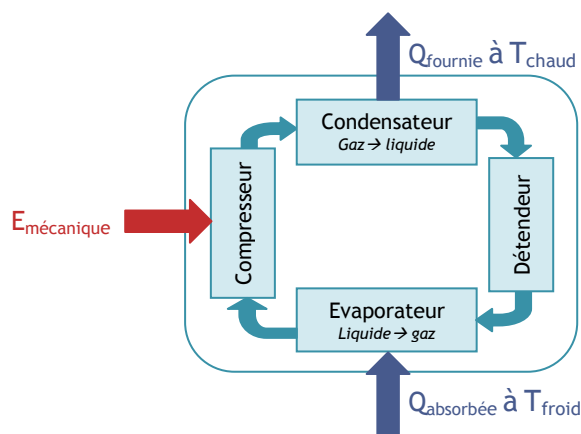


Figure 6 : Schématisation du fonctionnement des pompes à chaleur et systèmes frigorifiques

### 4.4 - Rendement exergetique des systèmes thermodynamiques

L'exergie est un concept développé à partir des première et seconde lois de la thermodynamique. Elle combine les équations d'équilibre énergétique et entropique pour générer un nouveau terme qui comprend à la fois les aspects quantitatifs énergétiques de la première loi et les aspects

qualitatifs influencés par la création d'entropie. Chaque transfert de chaleur génère de l'entropie, autrement dit des irréversibilités qui détruisent l'énergie disponible (voir [5]).

Le rendement exergetique permet de considérer le potentiel de conversion du système réel sur la base de la limite de Carnot et d'évaluer ses performances techniques.

Cas d'un moteur thermodynamique :  $\eta_{Ex} = \frac{\eta_{réel}}{\eta_{carnot}} < 1$

Cas d'une pompe à chaleur ou d'un système de production de froid :  $\eta_{Ex} = \frac{COP_{réel}}{COP_{carnot}} < 1$

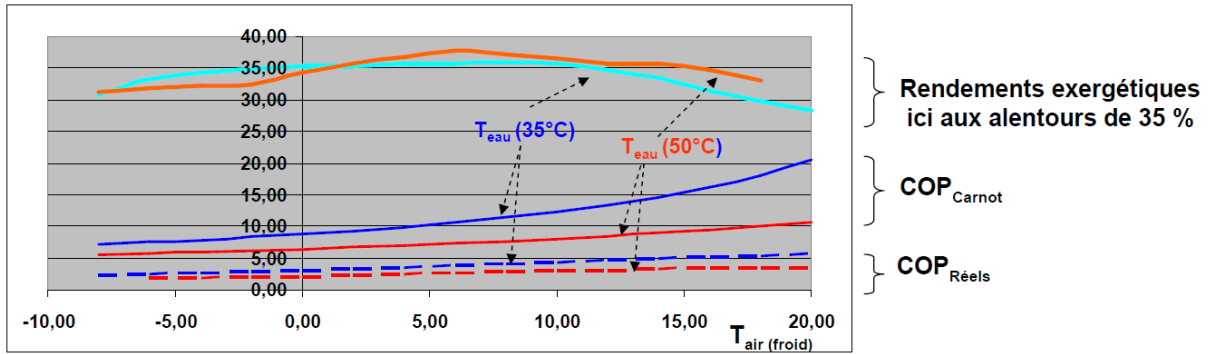


Figure 7 : Exemple d'une pompe à chaleur réelle air-eau 15 kW, image B. Multon

#### 4.5 - Conversions mécaniques et électriques

Il n'y a pas de limite thermodynamique aux conversions au sein de ces formes d'énergie ; il y a bien sûr un peu de pertes (frottements...), mais rien n'empêche le rendement de tendre vers 100%, c'est généralement une question de compromis technologique et économique.

Des « sources naturelles d'énergie mécanique » (donc primaires) existent dans l'environnement, elles sont associées à des processus thermodynamiques (effets du rayonnement solaire sur les cycles hydrologiques) comme les énergies hydrauliques, éoliennes ou encore celles associées à la gravitation, comme les effets de marées. La figure 8 montre des exemples de convertisseurs (turbines) de ces trois formes d'énergie primaires renouvelables.



Figure 8 : Exemples de convertisseurs de sources d'énergie primaire mécanique : roue hydraulique Pelton image Walter [6], éolienne et hydrolienne DCNS [7]

Les pertes dans les convertisseurs électromagnétiques que sont les transformateurs (effet Joule et pertes magnétiques, par hystérésis et par courants de Foucault<sup>6</sup>) ou dans les convertisseurs

<sup>6</sup> Du nom de Jean Bernard Léon Foucault (1819-1868) physicien français



électromécaniques comme les moteurs ou générateurs électriques, sont relativement faibles ; ces systèmes de conversions présentent des rendements qui peuvent tendre vers 100%.

Cependant, dans le cas de petits dispositifs, on observe en pratique des rendements parfois faibles dus à un choix de dimensionnement fondé sur un échauffement maximal (acceptable par les matériaux). Or, plus un système est petit, plus il dispose d'une surface élevée d'échange thermique avec l'environnement (surface en  $[L^2]$ ) relativement à son volume (en  $[L^3]$ ), ce qui autorise des densités de pertes élevées se traduisant par une valeur de rendement qui se dégrade aux petites dimensions. Mais il faut avoir en tête que ce n'est pas une fatalité.

Il en est de même pour les convertisseurs électroniques de puissance, désormais présents dans presque toutes les chaînes de conversion modernes des systèmes électriques. L'essentiel des pertes est dissipé dans les semi-conducteurs de puissance et les transformateurs électromagnétiques, les inductances et les condensateurs de puissance sont fondamentalement peu dissipatifs. Pour les mêmes raisons que celles évoquées dans le paragraphe précédent (lois d'échelle), les petits convertisseurs sont généralement des rendements plus faibles que les gros.

#### 4.6 - Conversion en lumière visible, rendement lumineux

L'unité de puissance lumineuse est le lumen [lm], le rendement lumineux d'une source de lumière s'exprime en lumen par watt [lm/W].

Les sources de lumières du commerce ont des rendements lumineux variables selon les technologies : de 10 à 20 lm/W pour les ampoules à incandescence (désormais prohibées), de 50 à 80 lm/W pour les ampoules à fluorescence, et de 50 à plus de 100 lm/W pour les ampoules à luminescence (LED).

### 5 – Cycle de vie complet

En termes de soutenabilité<sup>7</sup>, lors de l'étude énergétique d'un convertisseur, par exemple pour sa conception (donc son éco-conception), il est nécessaire de prendre en compte la totalité de l'énergie primaire non renouvelable consommée lors de sa vie pour rendre le service attendu.

Doivent alors être prises en compte toutes les énergies « consommées », de l'extraction des matières premières au recyclage en fin de vie du convertisseur en passant par sa production, son utilisation, son transport, son entretien... (figure 9). Des bases de données (Impact® de l'ADEME ou Ecoinvent par exemple), issues d'inventaires de cycle de vie, sont disponibles et régulièrement actualisées compte tenu des évolutions technologiques ; elles permettent de disposer de (presque) toutes les informations nécessaires pour mener à vie de telles études sur cycle de vie.

On parle d'énergie grise (représentée de cette même couleur figure 9) pour quantifier l'énergie consommée sur l'ensemble des procédés intervenant dans l'extraction des matières premières, la fabrication, la maintenance et le recyclage du convertisseur d'énergie.

---

<sup>7</sup> La soutenabilité est relative à la notion de développement durable, un développement censé répondre aux besoins des générations présentes sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs. Utilisée depuis les années 1990, la soutenabilité est un terme surtout employé dans les domaines de l'économie, de la sociologie et de l'écologie. Il désigne ce qui paraît raisonnablement contrôlable et le mode d'organisation à mettre en place en vue d'assurer la pérennité de l'humanité. Ainsi consommer des ressources énergétiques qui ne se renouvèlent pas est considéré comme non soutenable.

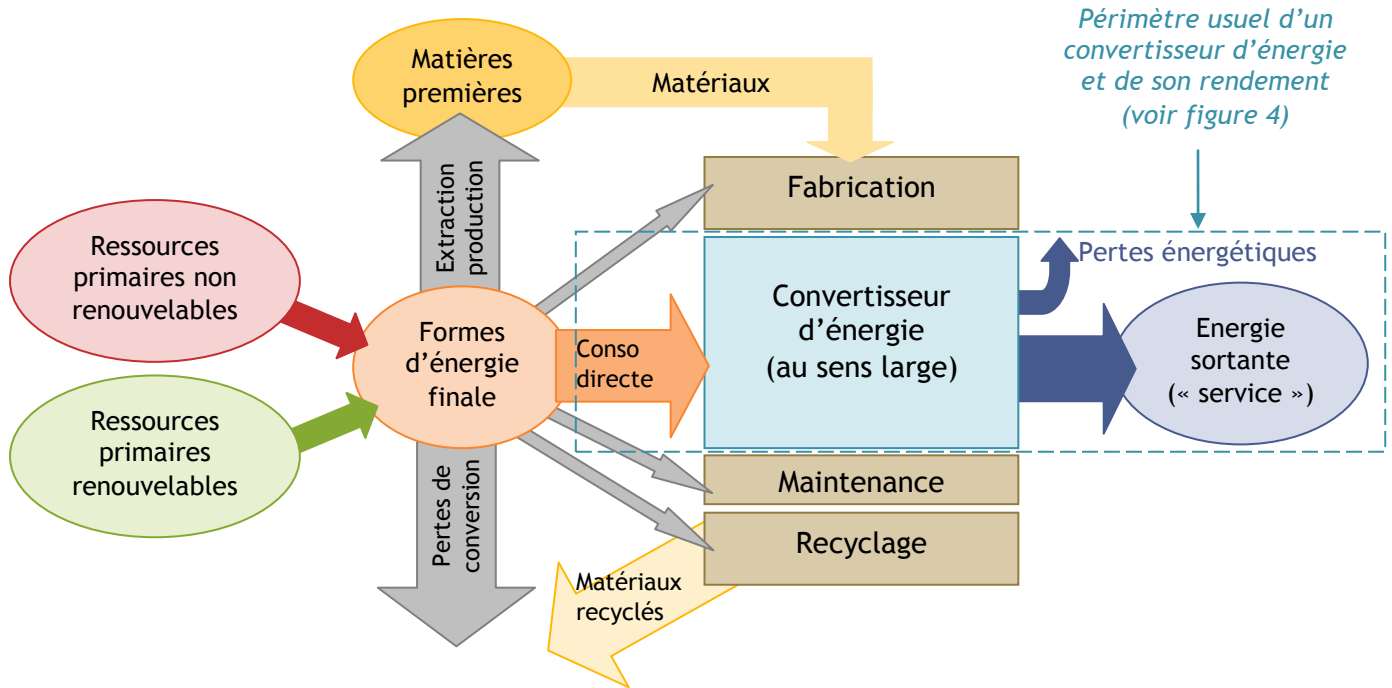


Figure 9 : Energie consommée sur cycle de vie d'un convertisseur, prise en compte de l'énergie grise, Image B. Multon

## 6 – Rendements et indicateurs

### 6.1 - Rendement instantané ou en puissance

En conversion d'énergie, les notions de rendement méritent d'être clarifiées. C'est pourquoi nous introduisons la notion de **rendement instantané** d'un convertisseur d'énergie, généralement appelé rendement sans adjectif et sans distinction du rendement énergétique dont nous parlons plus bas.

Le rendement instantané est le rapport des puissances sortante sur entrante (rapport des débits d'énergie), il varie avec la puissance utile ou puissance de sortie, car les pertes ne varient généralement pas proportionnellement avec le débit de la conversion d'énergie. Prenons l'exemple d'un moteur électrique à courant continu, la puissance absorbée est électrique et correspond au produit de la tension par l'intensité, la puissance utile est mécanique et correspond au produit du couple mécanique par la vitesse angulaire (figure 10).

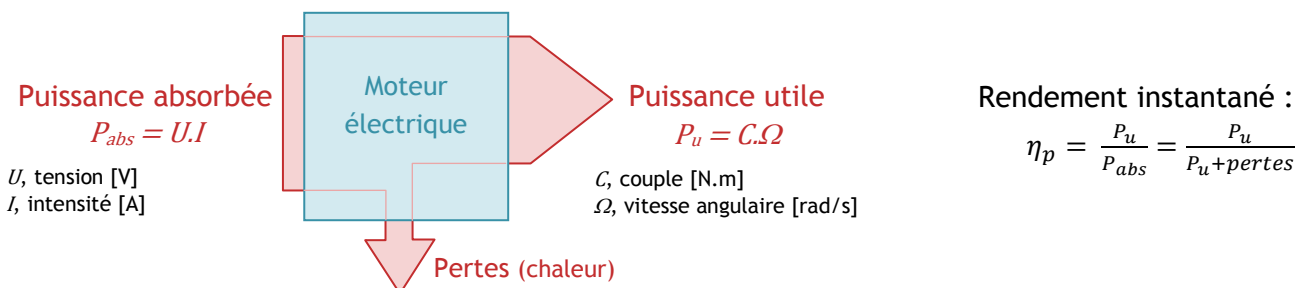


Figure 10 : Rendement instantané (ou en puissance) d'un moteur électrique

De façon simplifiée, les pertes sont deux types :

- Pertes en charge, fonction du couple :  $P_{ch} \approx k_1.C^2$ ,
- Pertes à vide, fonction de la vitesse :  $P_0 \approx k_2.\Omega^2$ .

Le rendement instantané s'exprime donc :  $\eta_p = \frac{P_u}{P_u + P_{ch} + P_0} = \frac{C \cdot \Omega}{C \cdot \Omega + k_1 \cdot C^2 + k_2 \cdot \Omega^2}$

Le rendement d'une conversion énergétique dépend du point de fonctionnement, ici  $(C, \Omega)$ , et à vitesse  $\Omega$  ou couple  $C$  donné, la courbe passe par un maximum (figure 11). Notons que l'allure de cette courbe est représentative de tous les convertisseurs d'énergie.

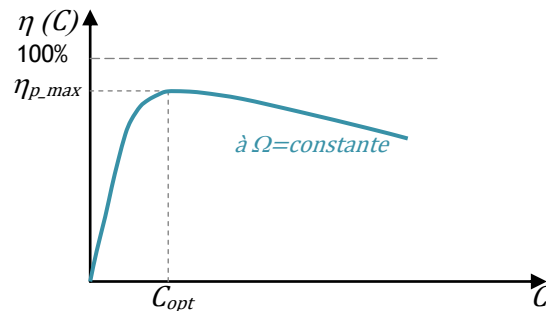


Figure 11 : Rendement d'un moteur électrique en fonction du couple  $C$  et à vitesse constante  $\Omega$

Mais fréquemment, un convertisseur d'énergie ne fonctionne pas à régime constant, la puissance utile varie en fonction de la demande de l'utilisateur ou du process. Dans le cas du moteur précédent, sur un cycle temporel, c'est-à-dire à vitesse et couple variables,  $\Omega(t)$  et  $C(t)$ , on peut définir le **rendement énergétique** (ou sur cycle) sur l'ensemble d'un cycle de fonctionnement par :

$$\eta_e = \frac{\int_{\text{cycle}} P_u \cdot dt}{\int_{\text{cycle}} P_{abs} \cdot dt} = \frac{\int_{\text{cycle}} C(t) \cdot \Omega(t) \cdot dt}{\int_{\text{cycle}} \frac{C(t) \cdot \Omega(t)}{\eta_p(C, \Omega)} \cdot dt} \text{ avec } \eta_e \leq \eta_{p\_max}$$

Pour calculer le rendement énergétique, il est nécessaire de connaître l'évolution des pertes en fonction des paramètres du point de fonctionnement, en l'occurrence s'il s'agit d'un entraînement électrique, du couple et de la vitesse. La figure 12 montre un exemple de cartographie du rendement instantané qui permettrait d'évaluer le rendement sur cycle pour un cycle donné.

Notons enfin que, lorsque le convertisseur est amené à fonctionner de façon réversible (changement du transfert du sens de l'énergie, dans l'exemple considéré : passages de moteur à générateur), il est préférable de calculer les pertes directement et de ne pas passer par le rendement instantané pour déterminer le rendement sur cycle.

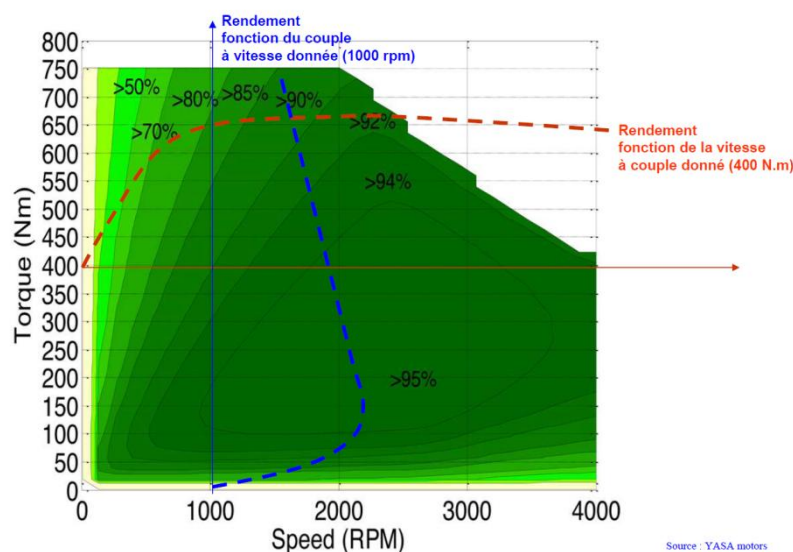


Figure 12 : Exemple de cartographie de rendement (en puissance) d'un moteur électrique réel, image YASA motors

## 6.2 - Du rendement instantané au rendement énergétique sur cycle de vie d'un convertisseur d'énergie

Rappel des définitions des deux rendements précédents :

**Rendement en puissance** ou rendement instantané, sur un point de fonctionnement particulier :

$$\eta_p = \frac{P_u}{P_{abs}}$$

**Rendement énergétique** ou sur cycle, sur un cycle de fonctionnement correspondant à un service :

$$\eta_e = \frac{\int_{cycle} P_u \cdot dt}{\int_{cycle} P_{abs} \cdot dt} = \frac{E_u}{E_{abs}} = \frac{E_u}{E_u + E_{pertes}}$$

Attention, le rendement sur cycle n'est pas égal à la moyenne pondérée du rendement instantané.

Afin d'intégrer un critère de soutenabilité, nous proposons un nouveau concept de rendement :

**Rendement sur cycle de vie soutenable**  $\eta_{LCA\_sust}$ <sup>8</sup>, ne comptabilisant que la consommation de ressources primaires non renouvelables :

$$\eta_{LCA\_sust} = \frac{E_{u\_vie}}{E_{u\_vie} + (E_{pertes\_vie\_p} + E_{grises\_p})_{NR}} = \frac{E_{u\_vie}}{\frac{E_{u\_vie} + E_{pertes\_vie\_p}}{\eta_{p-f_{NR}}} + E_{grises\_p_{NR}}}$$

L'indice *NR* indique la part non renouvelable de l'énergie primaire contenue dans l'énergie grise et dans les pertes de transformation de l'énergie finale qui alimente le convertisseur en question.

$\eta_{p-f_{NR}}$  est le rendement de transformation d'énergie primaire non renouvelable en énergie finale :  $\eta_{p-f_{NR}} = \frac{E_{finale}}{E_{p-NR}}$

Par exemple en France, pour l'électricité basse tension,  $\eta_{p-f_{NR}} = 0,2783$ <sup>9</sup>, ce qui signifie que pour livrer sur le lieu d'utilisation 1 kWh d'énergie électrique basse tension, on a consommé, ramené au cycle de vie du système de génération électrique, 3,6 kWh d'énergie primaire non renouvelable.

La prise en compte de ce rendement sur cycle de vie est importante pour réaliser une éco-conception des convertisseurs. En effet, concevoir un convertisseur d'énergie avec un meilleur rendement instantané (sur cycle d'usage) conduit, à technologie donnée, à dépenser plus de matières premières donc plus d'énergie grise.

Dès lors, on comprend bien qu'il existe un optimum de rendement sur cycle de vie dépendant fortement des usages. Par exemple, si l'on considère un moteur de volet roulant électrique qui ne fonctionne que quelques centaines d'heures cumulées sur toute sa vie et un moteur de ventilation mécanique qui travaille des dizaines de milliers d'heures, on aura des exigences de rendement bien plus faibles sur le premier que sur le second, ce dernier méritant que l'on dépense plus d'énergie grise pour améliorer sa performance sur cycle.

<sup>8</sup> *sust* pour sustainable ou soutenable.

<sup>9</sup> Source : Life Cycle Inventories of Electricity Mixes and Grid, R. Itten, R. Frischknecht, M. Stucki, Technical Report TREEZE Ltd., July 2012

### 6.3 - Indicateurs sur cycle de vie des convertisseurs d'énergie primaire

Lors de la « production » d'énergie, sous entendue finale à partir d'énergie primaire, il est possible de prendre en compte le cycle de vie des systèmes de conversion via deux indicateurs :

**EPBT** pour Energy Pay Back Time ou temps de remboursement de l'énergie : cet indicateur (en années) dépend du mix énergétique local de production, de la technologie...

$$EBPT = \frac{\text{Energie primaire NR consommée sur la vie}}{\text{Energie annuelle primaire substituée}}$$

On note un avantage environnemental sur le plan énergétique si  $EBPT <$  durée de vie. Dans le cas d'une production d'électricité (usage le plus fréquent de cet indicateur), le calcul de l'énergie primaire substituée est effectué sur la base du rendement  $\eta_{p-f_{NR}}$  employé dans le paragraphe précédent.

**EROEI** pour Energy Returned On Energy Invested ou énergie récupérée sur énergie investie :

$$EROEI = \frac{\text{Energie récupérée sur la vie}}{\text{Energie investie pour accéder à la ressource}}$$

Si  $EROEI > 1$ , on considère la « production » rentable. Cependant l' $EROEI$  traditionnel ne prend pas en compte la nature éventuellement non renouvelable des ressources consommées durant tout le cycle de vie. L' $EROEI$  d'une production d'électricité via du pétrole serait ainsi supérieur à celui d'une production éolienne ou photovoltaïque, sauf en considérant des pétroles extrêmement difficiles d'accès et dont la dépense énergétique pour les prélever est très élevée (ce qui devient de plus en plus le cas avec les pétroles non conventionnels). C'est la raison pour laquelle nous avons introduit un  $EROEI$  soutenable.

**EROEI<sub>sust</sub>** qui permet de comptabiliser la part non renouvelable consommée sur la vie :

$$EROEI_{sust} = \frac{\text{Energie récupérée sur la vie}}{\text{Part non renouvelable de l'énergie investie sur le cycle de vie}}$$

Si  $EROEI_{sust} > 1$ , la « production » d'énergie finale est bien soutenable.

### 6.4 - Application du rendement sur cycle de vie et de l'EROEI soutenable à des moyens de production d'électricité

**Réacteur nucléaire de 1 GW sur une durée de vie de 40 ans**, source [8]

Productivité	280 TWh <sub>e</sub> (7 TWh <sub>e</sub> /an)
Consommation d'uranium naturel	7800 tonnes (195 tonnes/an)
Extraction minière de l'uranium	0,58 TWh <sub>p</sub>
Transformation en combustible fissile (technologies optimales)	5,1 TWh <sub>p</sub>
Construction et démantèlement	9,3 TWh <sub>p</sub>
Stockage déchets	0,43 TWh <sub>p</sub>
Energie grise	15,4 TWh <sub>p</sub>
Rendement en puissance de conversion chaleur - électricité	33%

Rendement sur cycle de vie soutenable :  $\eta_{LCA_{sust}} = \frac{280}{280+(560+15,4)} = 32,7 \%$

Consommation d'énergie primaire non renouvelable sur le cycle de vie (rendement de production électrique 33%) :  $E_{pNR} = 280/0,33+15,4 \approx 855 \text{ TWh}_p$

$EROEI_{sust} = \frac{280}{855} = 0,327 < 1$  (sachant que ce mode de production d'électricité génère des déchets à longue durée de vie et qu'une grande partie des matières irradiées est non recyclable)

### Système photovoltaïque en toiture pour 2 x 20 ans de production, source [9]

(En toiture = sans occupation de superficie supplémentaire)

Productivité avec un rayonnement de 1000 kWh/m <sup>2</sup> /an	7 TWh <sub>e</sub> /an
Technologie au silicium polycristallin avec 16 % de rendement et un taux d'utilisation (PR) de 75%, soit 58 km <sup>2</sup> nécessaires 8500 km <sup>2</sup> sont bâties en France	50 TWh <sub>p</sub> (58 km <sup>2</sup> )
Fabrication des modules + montage en toiture + onduleur (fourchette de données)	280 à 730 kWh <sub>p</sub> /(m <sup>2</sup> PV)
Energie grise	16 à 42 TWh <sub>p</sub>
Rendement de conversion rayonnement solaire - électricité	16%

Consommation d'énergie primaire non renouvelable sur le cycle de vie sur 40 ans (incluant un renouvellement au bout de 20 ans) :  $E_{pNR} = 2*(16 \text{ à } 42) = 32 \text{ à } 84 \text{ TWh}_p$

Production d'énergie sur 40 ans :  $E_u = 2*20*7 = 280 \text{ TWh}_e$

Rendement sur cycle de vie soutenable :  $\eta_{LCA,sust} = \frac{280}{280+(32 \text{ à } 84)} = 76,9 \text{ à } 89,7 \%$

$EROEI_{sust} = \frac{280}{32 \text{ à } 84} = 3,3 \text{ à } 8,7 > 1$  (avec des matériaux recyclables, quelques déchets toxiques...)

La production photovoltaïque apparaît ainsi comme une solution soutenable, au moins du point de vue énergétique et des matériaux.

La même étude avec une installation de grandes éoliennes, conduit à des valeurs d' $EROEI_{sust}$  de l'ordre 10 fois plus élevées.

## 7 – Quelques exemples de conversions et analyses de leur efficacité énergétique

### 7.1 - Cas de l'éclairage

La technologie de la source de lumière est caractérisée par son rendement lumineux en lumens/watt. L'éclairage est le flux lumineux reçu, il est exprimé en lux : 1 lux = 1 lumen/m<sup>2</sup>. Il décroît avec le carré de la distance et dépend fortement du luminaire... Des préconisations existent en fonction des usages (couloirs, bureaux, salles d'intervention chirurgicale, ...)



Figure 13 : Des technologies de la source de lumière à l'éclairage



Un niveau d'éclairage donné peut être obtenu de différentes façons : éclairage localisé et optimisé comme une lampe de bureau, multiple éclairage diffus, ce qui conduit à des consommations d'énergie variables selon la solution retenue (éclairage focalisé ou de toute une pièce au même niveau d'éclairage). La possibilité de régler la puissance ainsi que les systèmes d'allumage/extinction automatique permettent de mieux ajuster la consommation au besoin. In fine, l'efficacité se mesure en kWh<sub>annuels</sub> par m<sup>2</sup> habitables ou encore par mètre de rue.

## 7.2 - Les bâtiments

Les bâtiments sont des systèmes complexes qui utilisent des convertisseurs pour le chauffage, l'eau chaude sanitaire, la ventilation, l'éclairage, les équipements électroménagers... La consommation des bâtiments, incluant généralement le chauffage, la ventilation, l'eau chaude et l'éclairage, s'expriment en kWh<sub>ep</sub>.m<sup>2</sup>/an ; le kWh<sub>ep</sub> (ep pour énergie primaire) prend en compte le rendement (contractuel et pas forcément physique) de conversion énergie primaire non renouvelable en énergie finale.

Par exemple, pour l'électricité basse tension en France, ce coefficient réglementaire est de 2,58, alors que nous avons vu plus haut, que sa valeur physique était de 3,6. Notons que la consommation des équipements (électroménager, cuisson, audiovisuel...) est non négligeable surtout si le bâtiment est performant (Bâtiments Basse Consommation, maisons passives) (voir [5]). La figure 14 montre l'évolution des consommations des bâtiments d'habitation en France (une énergie positive correspondrait à des bâtiments qui produisent annuellement plus qu'ils ne consomment).

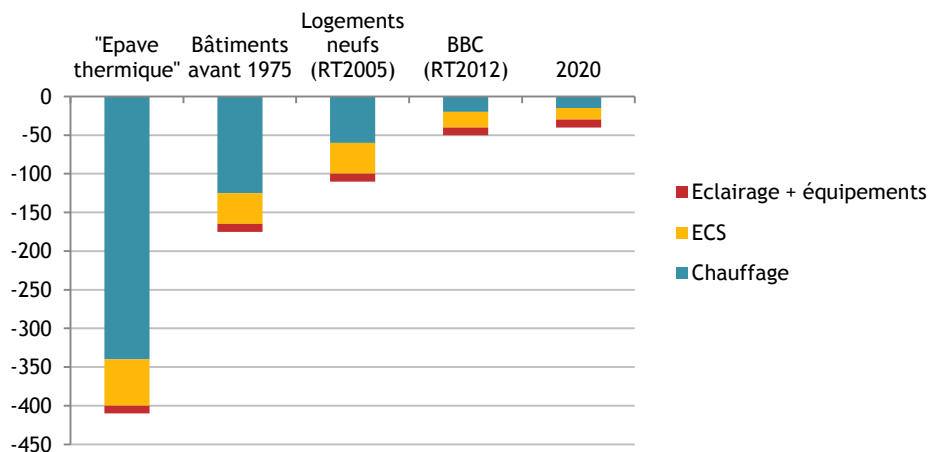


Figure 14 : Consommation (hors énergie grise) en kWh<sub>ep</sub>/m<sup>2</sup>/an dans les bâtiments, d'après J.C. Visier (CSTB) [10]

L'énergie grise (non prise en compte figure 14) de la consommation dans un bâtiment peut représenter de 20 à 100 kWh<sub>ep</sub>/m<sup>2</sup>/an pour un cycle de vie de 50 ans.

## 7.3 - Les véhicules terrestres

La puissance requise pour déplacer un véhicule dépend de la vitesse souhaitée  $V$  et de sa résistance à l'avancement :  $P = F.V$  [11]. L'effort  $F$  est constitué de la somme de quatre composantes : la résistance au roulement, la résistance aérodynamique, l'effort d'accélération et l'effort dû à la pente :  $F = F_{roul} + F_{aéro} + F_{pente} + F_{acc}$

$$F = CRR_{moy} \cdot M \cdot g + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot C_x \cdot S_x + M \cdot g \cdot p\% + M \cdot \gamma$$

$CRR_{moy}$  est le coefficient de résistance au roulement moyen sur les quatre roues et en ligne droite (les virages l'accroissent). Il dépend des pneumatiques utilisés, de leur pression de gonflage et du poids qu'ils supportent.  $M$  est la masse roulante,  $g$  est l'accélération de la pesanteur,  $\rho$  est la masse volumique de l'air,  $S_x$  est la section du véhicule perpendiculaire à la direction du déplacement  $x$ ,  $C_x$  est le coefficient de résistance aérodynamique,  $p\%$  la pente en % et  $g$  l'accélération selon la direction de déplacement.

En cycle urbain donc à faible vitesse, la masse a une importance majeure sur la puissance requise, or depuis 1984 la masse moyenne des véhicules commercialisés a augmenté de 40 % (en moyenne 900 kg contre 1250 kg en 2017) [12]. En cycle routier, à vitesse élevée la résistance aérodynamique est dominante.

Prenons l'exemple d'un véhicule équipé d'un moteur à essence de 53 kW (voir ses caractéristiques figure 15) se déplaçant à vitesse constante et en supposant un rendement constant de 23,5%. À 90 km/h, la puissance nécessaire au niveau des roues est de 10 kW représentant une consommation de 42,5 kW<sub>th</sub> soit environ 4,6 litres par heure (l/h) (1 litre d'essence contient 9,15 kW<sub>th</sub>). Ce même véhicule se déplaçant à 130 km/h requiert une puissance de 30 kW, avec un rendement de 28,5 % il consomme 105 kW<sub>th</sub> soit alors 11,5 l/h. Dans ce second cas, le trajet durant moins longtemps, la consommation à l'heure n'est pas directement comparable au premier cas. Ramenées en litres aux 100 km, à 90 km/h le véhicule consomme 5,1 l/100km et à 130 km/h 8,8 l/100km, soit une augmentation de 73% !

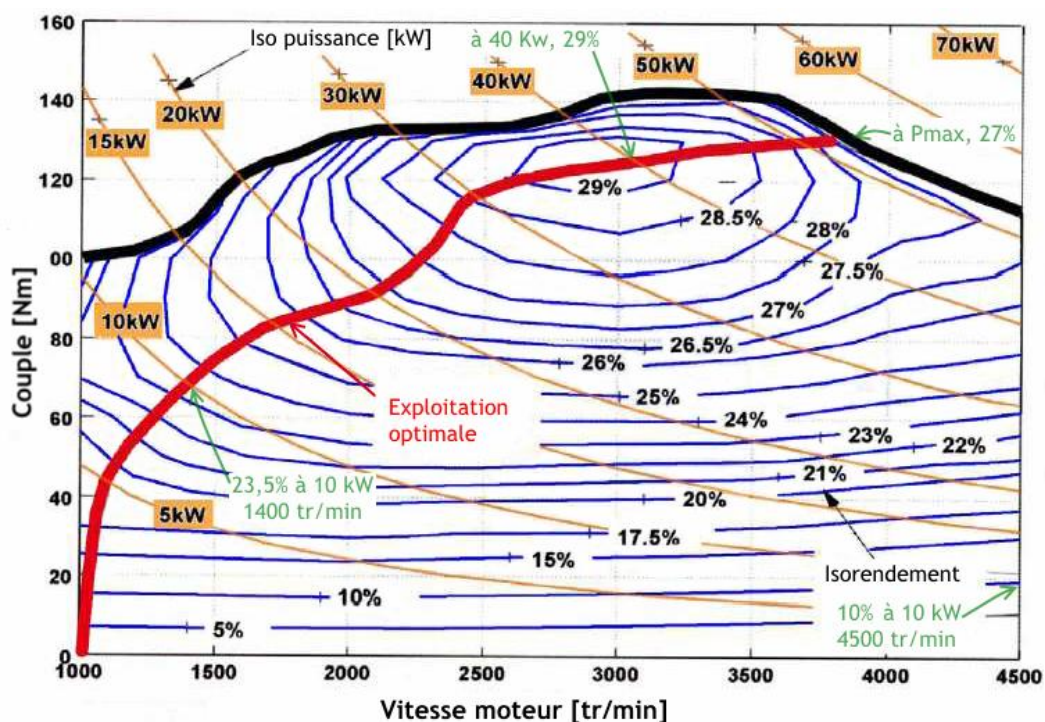


Figure 15 : Rendement d'un moteur à essence (53 kW - 72 cv), courbes d'isorendements dans le plan de couple - vitesse, source IFPEN [13]

Notons que plus le moteur est surdimensionné, plus son rendement sera dégradé à faible vitesse, son rendement étant maximal au voisinage de sa puissance nominale qui correspond à des vitesses de déplacement généralement interdites.

Le véhicule, qui a servi d'exemple précédemment, était équipé d'un moteur de 53 kW (puissance moyenne des automobiles à essence commercialisées en France en 1992). Si l'on montait dans ce même véhicule un moteur de 77 kW (moyenne actuelle) de même niveau technologique, pour une puissance développée de 10 kW, son rendement serait de 20% et sa consommation de 5,7 l/100km

(+12%) ; cependant pour une puissance de 30 kW, le rendement passerait à 26,5% et la consommation à 9,5l/100km. Si on ajoute à cet accroissement de la puissance nominale des moteurs, celui de la masse moyenne des automobiles, leur consommation n'a, en réalité, pas diminué malgré les améliorations apportées sur les performances de rendement des moteurs et contrairement aux spécifications techniques des fabricants, comme le montre le rapport [14] comparant, depuis le début des années 2000, les consommations en usage réel avec les spécifications des constructeurs...

## Electrification de la propulsion

Déjà largement utilisée dans les domaines ferroviaire et naval à de hautes puissances (100 kW à 20 MW unitaires), l'électrification de la propulsion permet, malgré une cascade de convertisseurs donc de pertes énergétiques supplémentaires, d'améliorer le rendement global grâce à l'optimisation du régime de rotation du moteur électrique.

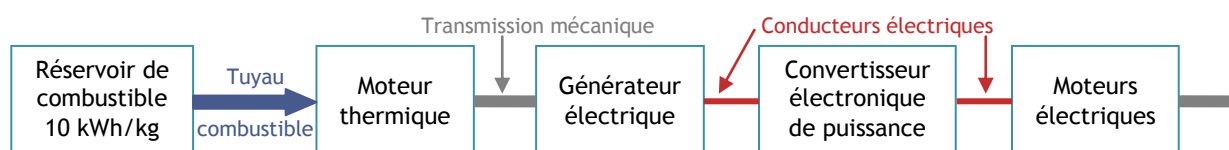


Figure 16 : Electrification de la propulsion via une solution hybride série (sans stockage électrique)

Trois architectures d'électrification de la propulsion existent : hybride série (figure 16), parallèle, série/parallèle (Prius). En embarquant un moyen de stockage électrique de faible capacité (ordre de grandeur de l'énergie cinétique du véhicule), le bilan peut être amélioré significativement grâce à une meilleure optimisation du régime du moteur thermique et de ses régimes transitoires, et, dans une moindre mesure, à la récupération d'énergie au freinage. Si la capacité de stockage du système hybride est accrue, il devient possible de recharger le véhicule à l'arrêt par une électricité issue de sources renouvelables (par exemple solaire), on parle alors de véhicules hybrides rechargeables (ou plug-in).

La densité énergétique des accumulateurs électrochimiques utilisés dans les véhicules électriques est très en dessous de celle des hydrocarbures liquides. Ces derniers ont une valeur énergétique d'environ  $10 \text{ kWh}_{\text{PCI}}/\text{kg}$  alors qu'une batterie lithium-ion automobile stocke  $150 \text{ Wh}_e/\text{kg}$  (facteur 60) et un système à pile combustible avec réservoir d'hydrogène environ  $1 \text{ kWh}_{\text{PCI}}/\text{kg}$  (mais avec un médiocre rendement de conversion de l'hydrogène, ce qui rapproche fortement la solution pile à combustible de celle à batterie).

Cependant le bilan énergétique global nécessite de prendre en compte la production d'électricité ou d'hydrogène et surtout de considérer le cycle de vie complet du véhicule, les coûts énergétiques, les durées de vie de composants... Dans ces conditions, les véhicules électriques à pile à combustible et hydrogène issu d'électrolyse témoignent d'un bilan sur cycle de vie environ trois fois moins bon que celui d'un véhicule électrique à batterie, ce qui explique largement la difficulté de cette technologie à émerger.

## Du puits à la roue

En guise d'illustration du raisonnement de puits à la roue (well-to-wheel en anglais), la figure 17 permet de comparer pour différents systèmes de propulsion, l'énergie consommée pour parcourir 1 km en différenciant l'énergie convertie de la source primaire (le puits) en énergie embarquée dans le véhicule (réservoir), de l'énergie embarquée convertie en énergie utile (à la roue) :

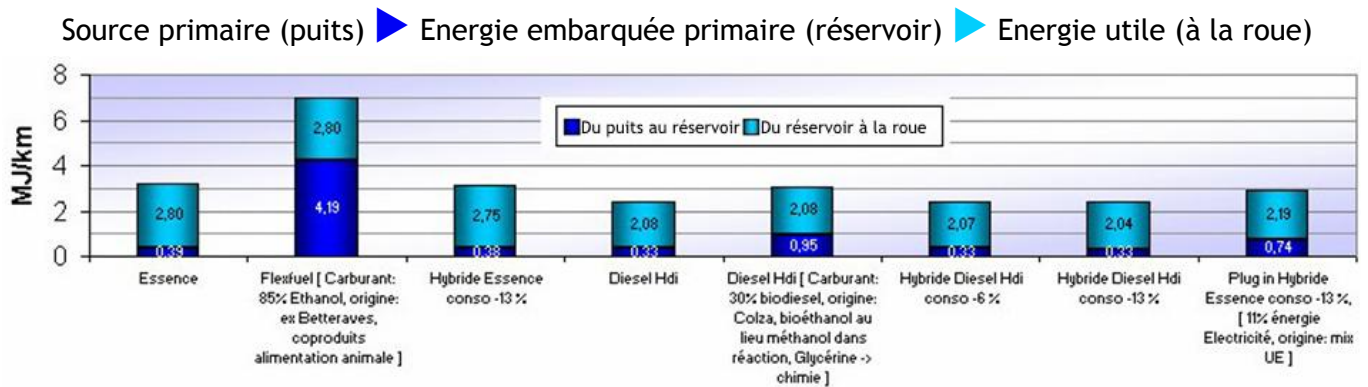


Figure 17 : Energie totale consommée pour parcourir 1 km, source PSA 2007 [15]

Pour toutes ces technologies de véhicules et de formes d'énergie embarquée, il est nécessaire de connaître le cheminement de l'énergie : comment sont produits l'électricité, l'hydrogène ou même l'air comprimé, quels sont les rendements de charge ou de compression (hydrogène), de la chaîne de traction... si la ressource primaire est fossile, les solutions à faible rendement ont un intérêt très limité, elles permettent de seulement déporter les pollutions.

Considérer l'énergie consommée sur tout le cycle de vie permet un raisonnement plus global incluant l'énergie grise du véhicule. En effet, la réduction de la consommation peut souvent s'accompagner d'un accroissement de l'énergie grise (batterie électrochimique, matériaux plus léger comme l'aluminium à la place de l'acier, ...). Dans l'exemple figure 18, la production de matières premières et le recyclage ainsi que la fabrication de ce véhicule de 1350 kg coûtent respectivement 8,1 et 9,1 MWh<sub>PCI</sub> soit 12 kWh<sub>PCI</sub>/kg ; sa phase d'utilisation pèse, quant à elle, 82,8 MWh<sub>PCI</sub>.

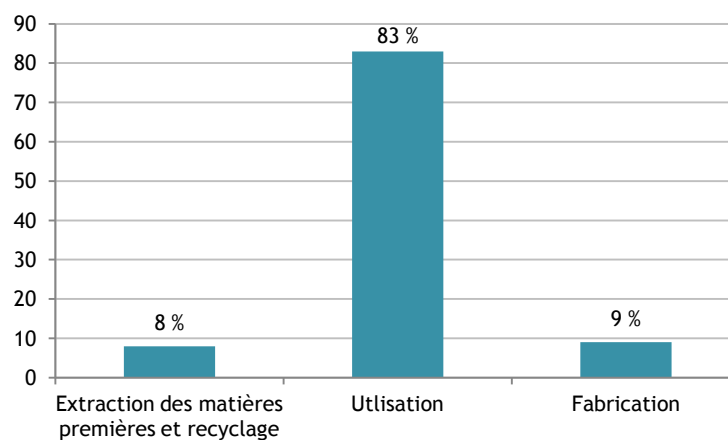


Figure 18 : Energie consommée pendant la vie d'une Peugeot 406 HDI (cycle de vie 150 000km, 10 ans, 5,6 l/100km de gasoil), source PSA - 2007 [14]

La consommation d'énergie primaire totale par rapport au cycle de vie des véhicules thermiques et électriques est un indicateur permettant de visualiser et comparer les consommations de véhicules, ici de trois types : essence, diesel et électriques alimentés par les mix français et allemand (figure 19). On remarquera le bilan mitigé des véhicules électriques alimentés via le système actuel consommant une très forte proportion d'énergie primaire non renouvelable (fossile et nucléaire), comme le montre la figure 20. Seule une alimentation par des sources renouvelables permettra de profiter pleinement du potentiel de cette technologie de transports terrestres.

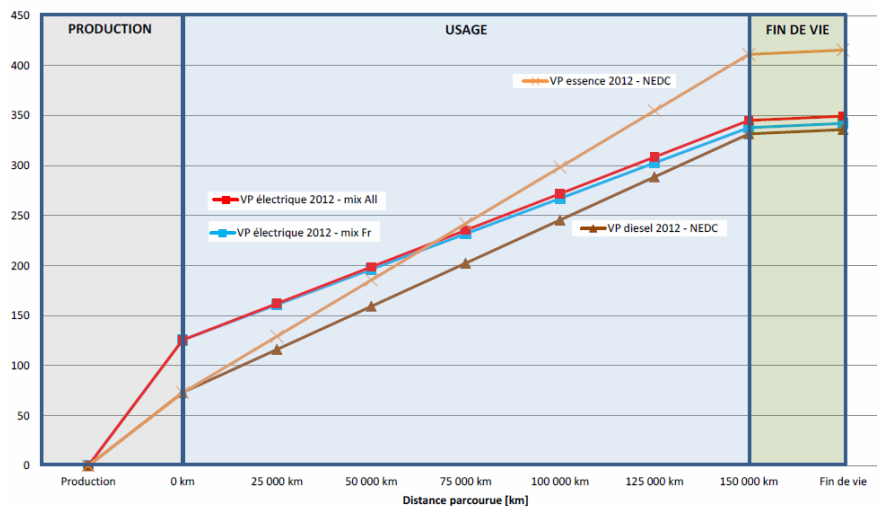


Figure 19 : Indicateur de consommation d'énergie primaire totale, source ADEME 2013 [15]

Scénario 2012	français	allemand
Nucléaire	76,6 %	23,3 %
Charbon	4,1 %	44,1 %
Pétrole	1,0 %	1,4 %
Gaz	4,5 %	15,2 %
Biomasse & déchets	1,0 %	4,6 %
Hydrolien	11,9 %	4,2 %
Eolien	1,0 %	6,4 %
Solaire	0,0 %	0,7 %
Géothermie et autres	0,0 %	0,0 %

Figure 20 : Détails de consommation d'énergie primaire pour les véhicules électriques français et allemand selon le scénario de référence 2012, source ADEME 2013 [16]

## 8 – Conclusion

L'une des premières règles à retenir concerne le juste dimensionnement des convertisseurs. En effet, l'usage de convertisseurs surdimensionnés conduit à des rendements sur cycle d'usage plus faibles (figure 21). Ce fait est valable pour tous les convertisseurs, que ce soit les moteurs des moyens de transports, les alimentations électriques et électroniques, les chaudières, l'éclairage, les productions industrielles... Le juste dimensionnement est aussi à prendre en compte à l'échelle du système consommateur d'énergie, que ce soit dans les transports (berline occupée par le seul conducteur), l'électroménager (réfrigérateur grand volume, lave-linge 8 kg) ou encore le logement... L'économie de consommation se retrouvera aussi sur les besoins en matières premières et donc sur l'énergie grise nécessaire.

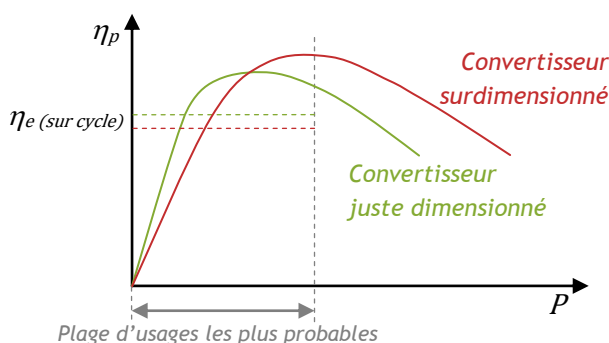


Figure 21 : Rendement sur cycle de deux convertisseurs pour une même utilisation



Le potentiel d'efficacité reste élevé via l'amélioration des technologies. Mais plus les performances deviennent élevées plus il est nécessaire d'inclure des approches sur cycle de vie car le poids relatif de l'énergie grise devient généralement significatif. La durée de vie elle-même se doit d'être optimisée notamment en fonction du potentiel d'améliorations technologiques futures. En outre, d'importantes économies sont encore possibles grâce à la sobriété qui passe par les comportements individuels, mais aussi par la législation (les limitations de vitesses mises en place après le premier choc pétrolier en sont un exemple emblématique).

In fine, le plus important est de réduire la consommation de ressources primaires non renouvelables sur tout le cycle de vie. Dans ce contexte, l'optimum économique et environnemental consiste à optimiser les usages des matières premières non énergétiques et recyclables (métaux, terres rares et autres matériaux).

## Références :

[1]: Ecole Normale Supérieure de Rennes, département Mécatronique, <http://www.mecatronique.ens-rennes.fr/>

[2]: Laboratoire Systèmes et Applications des Technologies de l'Information et de l'Energie (SATIE), Pôle Composants et systèmes pour l'Energie électrique (CSEE), Groupe Systèmes d'Energie pour les Transports et l'Environnement (SETE), <http://satie.ens-paris-saclay.fr/version-francaise/la-recherche/pole-csee-composants-et-systemes-pour-l-energie-electrique/groupe-sete-systemes-d-energies-pour-les-transports-et-l-environnement/>

[3]: Efficacité énergétique : aspects physiques et technologiques de la conversion d'énergie, B. Multon, 6<sup>e</sup> Ecole Energies & Recherches, Roscoff mars 2014. <https://cel.archives-ouvertes.fr/cel-01246807>

[4]: <https://www.celluleenergie.cnrs.fr/Ecole-Energies-et-Recherches-2018>

[5]: La cloacothermie ou l'énergie renouvelable des eaux usées, Culture Sciences de l'Ingénieur, [http://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources\\_pedagogiques/la-cloacothermie-ou-lenergie-renouvelable-des-eaux-usees](http://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/la-cloacothermie-ou-lenergie-renouvelable-des-eaux-usees)

[6]: <https://www.walter-tools.com>

[7]: <https://www.naval-group.com/fr/>

[8]: Energy Analysis of Power Systems, dec. 2013, World Nuclear Association

[9]: Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems, Report IEA-PVPS T12-02:2011

[10]: CSTB, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, <http://www.cstb.fr/>

[11]: Problème de la motorisation d'un véhicule électrique, B. MULTON, L. HIRSINGER, journées de la section électrotechnique du club EEA, mars 1994, hal-00673946.

[12]: Evolution du marché, caractéristiques environnementales et techniques. Véhicules particuliers neufs vendus en France, ADEME, Edition 2017.

[13]: IFPEN, Institut Français du Pétrole Energies Nouvelles, <http://www.ifpennergiesnouvelles.fr/>



[14]: From Laboratory to Road. A 2017 Update of Official and 'Real-World' Fuel Consumption and CO2 Values for Passengers Cars in Europe, ICCT, TNO, nov. 2017.

[15]: Automobile et développement durable. Bilans actuels et évolutions pour le futur, J. Beretta (PSA), journées du club EEA « énergie et développement durable », Rennes, 14-15 mars 2017.

[16]: Rapport ADEME 2013, « Élaboration selon les principes des ACV des bilans énergétiques, des émissions de gaz à effet de serre et des autres impacts environnementaux Induits par l'ensemble des filières de véhicules électriques et de véhicules thermiques , VP de segment B (citadine polyvalente) et VUL à l'horizon 2012 et 2020 ».