

Concepts et chiffres de l'énergie : Comment définir le rendement d'un convertisseur d'énergie ?

Culture Sciences de l'Ingénieur

Delphine CHAREYRON - Hélène HORSIN MOLINARO
Bernard MULTON

Édité le
18/01/2021

école
normale
supérieure
paris-saclay

Le dossier « Concepts et chiffres de l'énergie » est co-rédigé et co-publié avec le site [Culture Sciences Physique](#). Les données sont tirées de nombreuses références (rapports de groupes de recherche, publications dans des revues spécialisées, rapports d'instituts nationaux...).

Dans cette ressource, nous nous intéressons aux convertisseurs d'énergie et aux notions de rendement qui les caractérisent. Ces notions, en apparence triviales, nécessitent justement d'être clarifiées.

Les définitions des termes employés peuvent être retrouvées dans le [glossaire](#).

1 – Conversion d'énergie et rendement instantané

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 d'énergie, donc engendre des pertes sous forme de chaleur dissipée dans l'environnement. L'énergie est transformée par un **convertisseur d'énergie** qui dépend du service à réaliser ; le convertisseur peut être un moteur électrique ou thermique, une lampe, une chaudière, etc.

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 par le convertisseur permettant de réaliser ce service.

Dans la plupart des cas, les services convertissent de l'énergie finale¹, qui est une forme d'énergie commercialisée et directement consommable. L'énergie finale est, elle-même, transformée à partir de ressources primaires (figure 1). Les **ressources énergétiques primaires** sont disponibles à l'état brut dans la nature, on peut les classer en deux catégories : celles des stocks non renouvelables contenus dans le sous-sol (fossiles et fissiles) et celles des flux renouvelables, provenant essentiellement du soleil. Les formes d'**énergie finale** sont directement utilisables dans les convertisseurs. **L'énergie utile** correspond quant à elle aux services énergétiques attendus.

¹ On retrouvera les définitions des énergies finale, primaire et utile dans le [glossaire](#) du dossier Concepts et chiffres de l'énergie

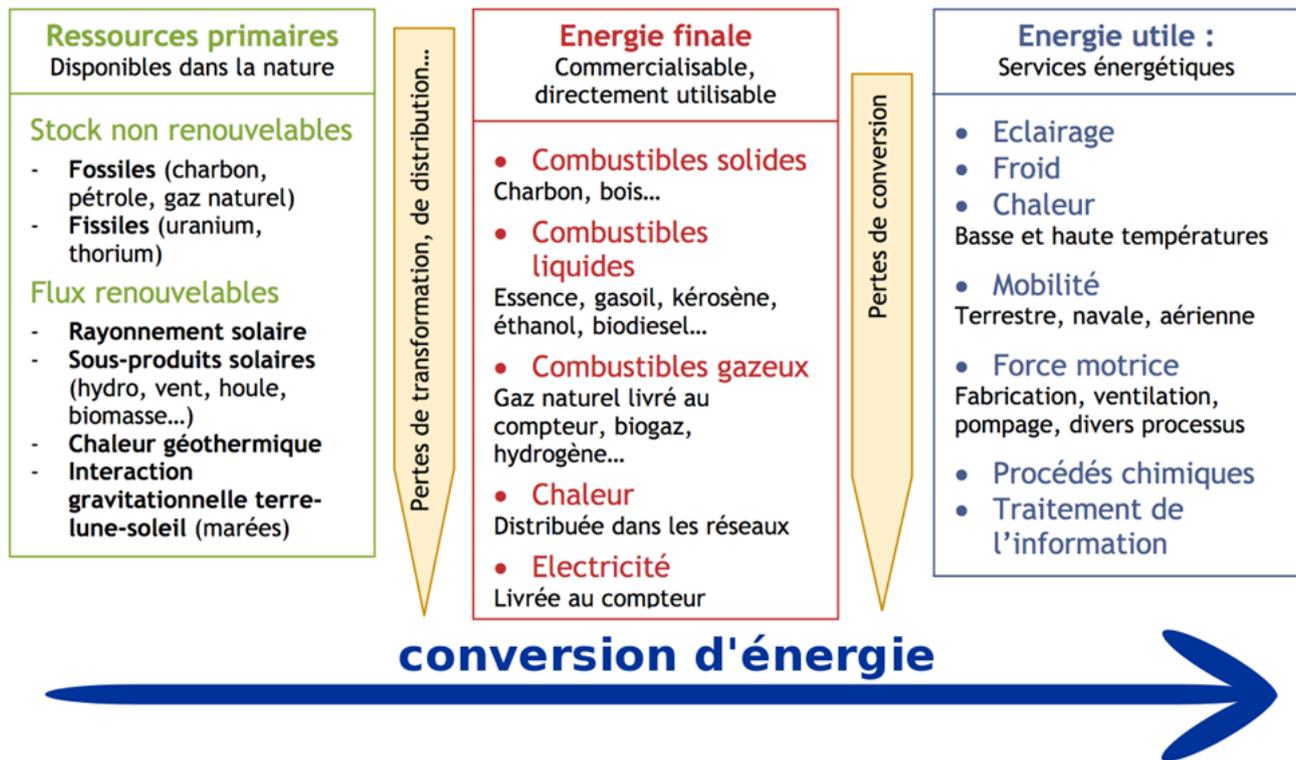


Figure 1 : Des ressources primaires aux services énergétiques, source B. Multon [1]

On définit souvent le rendement d'un convertisseur par le rapport de la puissance sortante ou utile P_u sur la puissance entrante ou absorbée P_e , en un point de fonctionnement donné, ce rendement est appelé **rendement instantané** ou **rendement en puissance** :

$$\eta = \frac{P_u}{P_e}$$

La conversion entraîne inévitablement des pertes P_p telles que :

$$P_p = P_e - P_u \text{ et } \eta = \frac{P_u}{P_e} = \frac{P_e - P_p}{P_e}$$

Mais, dans un convertisseur d'énergie, le rendement instantané dépend du point de fonctionnement, défini généralement en fonction de la valeur de la puissance utile. La figure 2 montre sa courbe d'allure générique en cloche, plus ou moins plate selon les technologies. Le rendement instantané passe donc par un maximum tout en restant inférieur à 100%.

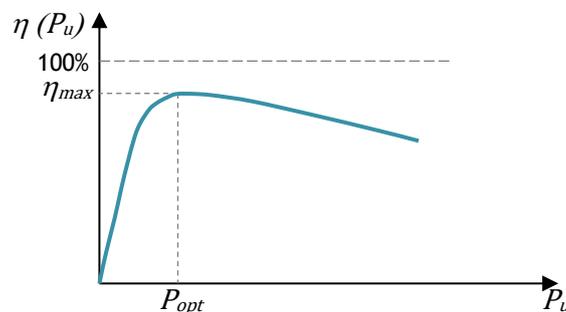


Figure 2 : Allure générique d'une courbe de **rendement instantané** d'un convertisseur d'énergie en fonction de la puissance utile (P_u)

Fréquemment, un convertisseur d'énergie fonctionne à différents régimes, et donc pas seulement au régime optimal car la puissance utile varie en fonction de la demande de l'utilisateur. Dans le cas des convertisseurs d'énergie, on peut définir le **rendement énergétique** (ou sur cycle) sur

l'ensemble d'un cycle de fonctionnement, correspondant par exemple à un usage typique, par l'expression :

$$\eta_e = \frac{\int_{\text{cycle}} P_u \cdot dt}{\int_{\text{cycle}} P_e \cdot dt} \text{ avec } \eta_e \leq \eta_{\text{max}}$$

Très souvent, lorsqu'une valeur de rendement est donnée, on ne précise pas s'il s'agit de celle de son rendement instantané (souvent sa valeur maximale) ou de son rendement sur cycle (sur un cycle à préciser), ce qui constitue alors une source de confusion. Pour exemples, voici quelques ordres de grandeur de rendements qui apparaissent très souvent dans la « littérature » :

- Production électronucléaire : 33% ;
- Conversion photovoltaïque du rayonnement solaire : aux alentours de 20% ;
- Conversion éolienne (très variable en fonction de la vitesse du vent et volontairement dégradée pour les vents forts) : entre 0 et 50% ;
- Moteur thermique d'automobile : 25%
- La photosynthèse : de l'ordre de 1% sur une année.

Mais à quoi correspondent réellement ces chiffres ? À la valeur maximale du rendement instantané, à un rendement sur cycle, etc.? Et même à quel maillon de la chaîne de conversion dans des systèmes complexes tels la production électronucléaire (fission, turbine, ou global) ?

En outre, dans un contexte où l'on se préoccupe de plus en plus d'épuisement des ressources non renouvelables et de soutenabilité, il semble nécessaire d'introduire de nouveaux concepts. En effet, comment justifier que la production d'électricité solaire photovoltaïque (renouvelable) soit plus pertinente que la production électronucléaire (épuisable) alors que le rendement de la première est souvent inférieur à celui de la seconde ?

Au sujet de l'épuisement des ressources et des réserves, on pourra retrouver la ressource « [Concepts et chiffres de l'énergie : Réserves et ressource en énergie et matières premières non énergétiques](#) » [2].

2 – Introduction d'un critère de soutenabilité pour le calcul du rendement

2.1 - Énergie grise

Figure 3 [1], sont schématisés les flux de matières non énergétiques et d'énergie sur l'ensemble de la vie d'un convertisseur (extraction des minerais, fabrication, utilisation, recyclage, ...). Les rendements instantané et énergétique, définis plus haut, correspondent uniquement au périmètre délimité par le rectangle en pointillé bleu. Dans la notion de rendement instantané, beaucoup de flux sont omis.

On parle d'**énergie grise** (Embodied energy en anglais, E_{emb} , représentée de cette même couleur figure 3) pour quantifier la somme de toutes les consommations d'énergie primaire non renouvelable (souvent exprimée en joules dans les bases de données), en dehors de celle de la phase d'usage.

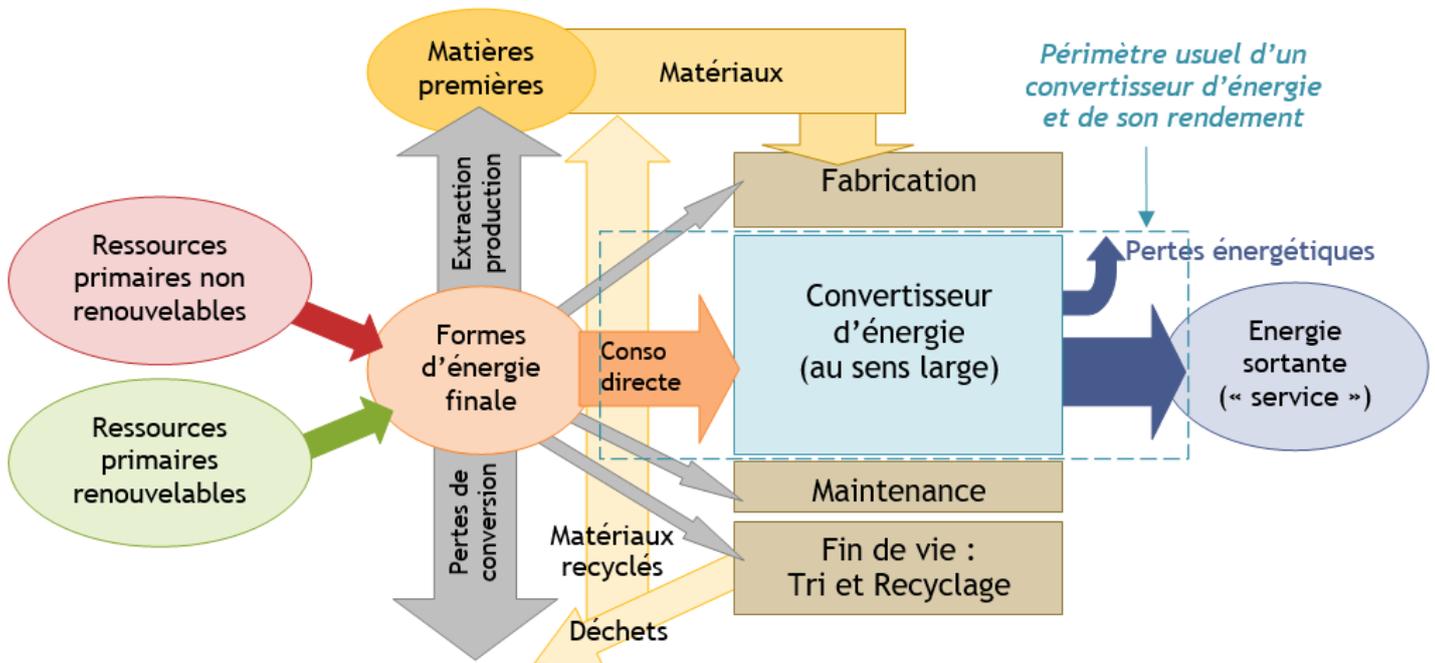


Figure 3 : Énergie consommée sur le cycle de vie d'un convertisseur, prise en compte de l'énergie grise, source B. Multon [1]

La prise en compte de l'ensemble du cycle de vie des objets et des services est devenue une nécessité si l'on veut éviter de déplacer les pollutions en dehors d'un périmètre trop restreint à cause d'une optimisation trop locale des objets considérés. Dans le contexte énergétique, l'énergie grise doit être prise en compte.

Ainsi, lorsque l'on veut définir le rendement énergétique de convertisseurs, mais aussi le maximiser lors de la phase de conception, toutes les formes d'énergie non renouvelables « 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,... doivent être considérées. Si des ressources renouvelables sont « consommées », seule la quantité non renouvelable qui a servi à fabriquer leurs propres convertisseurs (usines photovoltaïques par exemple) doit être considérée (sur la base d'un principe d'allocation de la part dédiée à l'objet concerné via une méthodologie implantée dans les logiciels d'analyse de cycle de vie²).

Considérons par exemple le cas d'un moteur thermique d'automobile (en incluant tous les accessoires permettant de le faire fonctionner). Il faut prendre en compte les différentes étapes de sa vie :

- L'extraction des minerais requis pour sa fabrication avec des machines qui consomment de l'énergie finale (hydrocarbures liquides, électricité...)
- La transformation des minerais en matières premières (acier, cuivre, terres rares...) par des procédés industriels exploitant également divers convertisseurs ;
- La fabrication via des machines industrielles dans des usines ;
- Les différentes étapes de transport (matériaux, pièces diverses... jusqu'à la livraison) ;
- Les dépenses énergétiques des étapes de maintenance durant la vie du convertisseur ;
- Le recyclage en fin de vie.

² Analyse sur Cycle de Vie (ACV) : recense et quantifie, tout au long de la vie des produits, les flux physiques de matière et d'énergie associés aux activités humaines. Pour plus de précisions voir [glossaire](#)

À noter que les différents convertisseurs, utilisés durant les phases de fabrication, de maintenance et de recyclage, ont eux-mêmes consommé de l'énergie non renouvelable qui, comme on l'a écrit plus haut, sera prise en compte, via le principe des allocations.

La somme de l'ensemble des consommations d'énergie non renouvelable, en dehors de celle de la phase d'usage (dans le présent exemple, le combustible brûlé dans le moteur thermique), représente l'énergie grise du convertisseur.

2.2 - Rendement sur cycle de vie

Afin d'intégrer un critère de soutenabilité, nous proposons un nouveau concept de rendement : **Rendement sur cycle de vie soutenable** η_{LCA_sust} ³, 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 égal au rapport de l'énergie finale consommée par le convertisseur sur la part non renouvelable d'énergie primaire qui a contribué à la production de la dite énergie finale : $\eta_{p-f_{NR}} = \frac{E_{finale}}{E_{p-NR}}$

Par exemple en France, pour l'électricité basse tension, $\eta_{p-f_{NR}} = 0,2783$ [3], 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. Ces chiffres sont fondés sur des valeurs de la première décennie des années 2000. Avec la croissance de la part de production renouvelable, ce rendement s'améliore continûment. Cette remarque concernant la dynamique d'évolution intéresse toutes les données d'analyse de cycle de vie inévitablement fondées sur les « inventaires de cycle de vie » datant d'au moins une dizaine d'années. Globalement, quasiment partout sur la planète, le mix énergétique s'améliore du point de vue de la consommation de ressources non renouvelables et plus encore lorsqu'il s'agit du domaine de l'électricité qui progresse le plus rapidement.

La prise en compte du rendement sur cycle de vie est importante pour réaliser la 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. En effet, généralement, l'amélioration du rendement énergétique d'un convertisseur conduit à un accroissement de la consommation d'énergie grise (matériaux plus coûteux à l'extraction et à la transformation, voire plus de quantité de matériaux). Ainsi, la durée d'usage du convertisseur sera centrale dans son optimisation globale. Dans le cas d'un convertisseur, dont la durée d'usage prévue est faible, la minimisation de la consommation totale d'énergie primaire non renouvelable (énergie grise + phase d'usage) conduira à un rendement énergétique plus faible que si ce même convertisseur doit être dimensionné pour une longue durée

³ *sust* pour sustainable ou soutenable.

d'usage. Dans ce dernier cas, il sera plus avantageux de dépenser plus d'énergie grise pour, ensuite, réduire la consommation d'énergie de la phase d'usage [4].

2.3 - Synthèse : de l'efficacité énergétique aux rendements

L'efficacité énergétique consiste à minimiser la consommation d'énergie pour assurer un service, grâce à des technologies plus efficaces. Dans le contexte de développement durable, que nous devons désormais absolument intégrer, il s'agit de minimiser la quantité d'énergie primaire non renouvelable consommée associée à ce service.

L'association négaWatt a notamment formalisé ce concept d'efficacité, parallèlement à celui, tout aussi crucial, de sobriété. Cette formalisation passe par une déclinaison de 4 niveaux d'efficacité dont l'optimisation est plus ou moins imbriquée lors de la phase de conception d'un service [5] :

- « Efficacité adaptative », ou à l'utilisation, permettant de concevoir des services minimisant les besoins d'énergie utile ;
- « Efficacité d'appareillage » permettant d'optimiser la consommation d'énergie finale dans l'ensemble des convertisseurs mis en jeu dans le service ;
- « Efficacité du système énergétique productif » permettant de minimiser la consommation d'énergie primaire non renouvelable lors de la phase de production d'énergie finale ;
- « Efficacité à la construction/fabrication » permettant d'optimiser la consommation d'énergie grise. Cette efficacité joue sans doute le rôle le plus transversale.

Dans cette démarche d'amélioration de l'efficacité, les notions de rendement sont essentielles et doivent être considérées lors des phases de conception, de façon plus ou moins élargie selon le périmètre auquel on peut prétendre, la notion de rendement sur cycle de vie intégrant la prise en compte la plus large qui soit. Dans une autre ressource « Concepts et chiffres de l'énergie : Conversion d'énergie et analyse sur cycle de vie » [6] dédié à l'analyse sur cycle de vie, nous abordons plus en détail les différents éléments à prendre en compte : tous les impacts environnementaux et pas seulement l'énergie primaire non renouvelable.

Dossier Concepts et Chiffres de l'Énergie

Retrouvez toutes les ressources du dossier « [Concepts et Chiffres de l'Énergie](#) »

Retrouvez « Concepts et chiffres de l'énergie » sur le site [Culture Sciences Physique](#)

Références :

[1]: Conversion d'énergie et efficacité énergétique, B. Multon, H. Horsin Molinaro, Septembre 2018, https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/conversion-denergie-et-efficacite-energetique

[2]: Concepts et chiffres de l'énergie : réserves et ressources en énergie et matières premières non énergétiques, D. Chareyron, H. Horsin Molinaro, B. Multon, octobre 2020, https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/les-chiffres-de-lenergie-reserves-et-ressources-en-energie-et-matieres-premieres-non-energetiques

[3]: Life Cycle Inventories of Electricity Mixes and Grid, R. Itten, R. Frischknecht, M. Stucki, Technical Report TREEZE Ltd., july 2012, <http://esu-services.ch/fileadmin/download/publicLCI/itten-2012-electricity-mix.pdf>

[4]: Expériences de recherche en éco-conception dans le domaine du Génie Electrique, B. Multon, et al., EJEE 2012, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00762824>

[5]: Scénario négaWatt 2017-2050, <https://negawatt.org/Scenario-negaWatt-2017-2050>
Manifeste négaWatt en route pour la transition énergétique ! T. Salomon, M. Jedliczka et Y. Marignac, Actes Sud 2015.

[6]: Concepts et chiffres de l'énergie : conversion d'énergie et analyse sur cycle de vie, D. Chareyron, H. Horsin Molinaro, B. Multon, janvier 2021, https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/concepts-chiffres-energie-conversion-denergie-et-analyse-sur-cycle-de-vie