

# Facts & Figures

## L'EXERGIE

CONCEPT, ENJEUX ET USAGES POUR L'INDUSTRIE

Avril 2013

ENEA Consulting est une société de **conseil en énergie et développement durable pour l'industrie**. ENEA intervient en conseil stratégique, en accompagnement à l'innovation et aux projets ainsi qu'en tant qu'expert et formateur sur ces sujets.

La présente publication s'inscrit dans la politique de partage des connaissances essentielles d'ENEA, dont l'objectif est de présenter les clés de compréhension des grands enjeux de la transition énergétique et du développement durable.

Elle est le fruit de l'expérience des experts d'ENEA sur la thématique de l'exergie (notamment au travers de nos prestations d'accompagnement et de conseil d'acteurs industriels) et de recherches spécifiques en interne.



This work is licensed under the Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Partage à l'Identique 2.0 France License. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.0/fr/> or send a letter to Creative Commons, 444 Castro Street, Suite 900, Mountain View, California, 94041, USA.

## DÉFINITION ET CONCEPT

Dans un contexte de pression sur les ressources naturelles, notamment énergétiques, la réduction des consommations d'énergie est un enjeu crucial. La notion d'exergie offre un cadre global, standard et rigoureux à l'analyse des systèmes énergétiques, et, à ce titre, participe à la compréhension et la gestion systémique du défi énergétique.

**L'exergie mesure l'énergie « utile » qui peut être extraite d'un réservoir ou d'un flux énergétique. Il s'agit également de l'énergie minimale requise pour créer ce réservoir ou ce flux énergétique.**

Cette métrique dépend de l'état du réservoir ou du flux (température, pression, composition...) mais aussi de l'état de l'environnement (température, pression ambiantes...), et s'exprime dans la même unité que l'énergie (le Joule dans le système métrique). Une définition thermodynamique de l'exergie est exposée en annexe.



### Qu'est-ce que l'énergie « utile » ?

L'énergie est dite « utile » si elle est entièrement transformable par un système idéal (c'est-à-dire sans pertes) en n'importe quelle autre forme d'énergie. Généralement l'énergie « utile », c'est-à-dire l'exergie, représente une fraction seulement de l'énergie.

Plus la part « utile » de l'énergie est importante, plus cette énergie est de « haute qualité ». Le ratio de l'exergie  $X$  (« chi ») sur l'énergie  $E$  est appelé indice exergetique ( $X/E$ ), et représente une mesure de la qualité d'une énergie, c'est à dire son degré d'utilité.

La figure 1 présente les indices exergetiques de différentes énergies. L'énergie électrique et l'énergie mécanique sont des formes d'énergie de très haute « qualité » : leur indice exergetique est de 100%, l'exergie est égale à l'énergie. A l'inverse, la qualité de l'énergie thermique est variable, et d'autant plus faible que le niveau de température à laquelle elle est disponible est bas (voir l'encart *Exergie et échanges thermiques* p. 5).

**Ainsi, toutes les formes d'énergie ne sont pas égales, et l'exergie permet de quantifier cette différence, en introduisant les notions de « qualité » de l'énergie et d'énergie « utile ».**

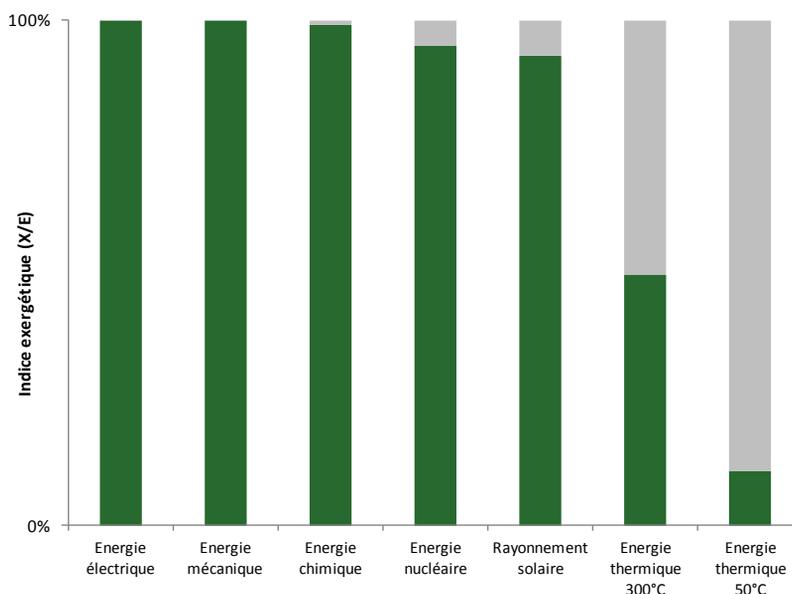


Figure 1 : Indice exergetique de différentes formes d'énergies. Température du milieu ambiant prise à 15 °C

# DÉFINITION ET CONCEPT



## Le déséquilibre, moteur des systèmes énergétiques

Le fonctionnement de tout système énergétique s'explique par un déséquilibre entre les états thermodynamiques de plusieurs réservoirs. La figure 2 présente des exemples de systèmes ou procédés énergétiques et la grandeur en déséquilibre sur laquelle ils s'appuient.

Système ou procédé énergétique	Grandeur en déséquilibre sur laquelle il s'appuie
Piston	Pression
Machine thermique	Température
Osmose <sup>1</sup>	Concentration
Pile	Potentiel électrochimique

Figure 2 : Exemple de grandeurs dont l'écart avec le milieu ambiant se traduit en exergie

L'exergie mesure en fait le potentiel de fonctionnement d'un système dans le milieu ambiant, en évaluant l'énergie utile pouvant être extraite d'un réservoir, ou bien la part utile d'un flux énergétique. **L'exergie quantifie le potentiel issu du déséquilibre entre un réservoir et l'environnement, en exprimant l'énergie utile qu'il est possible de générer en s'appuyant sur ce déséquilibre.**

L'état du milieu ambiant (pression, température, composition...) n'est pas pris en compte par l'approche énergétique traditionnelle, qui s'appuie sur des niveaux d'énergie quantifiés dans l'absolu. Sa prise en compte par l'approche exergétique représente donc une complexité nouvelle, mais nécessaire à l'évaluation de cette énergie « utile ».

<sup>1</sup>Voir à ce sujet la publication d'ENEA sur les EMR: [Les énergies marines renouvelables](#)

## DÉFINITION ET CONCEPT



### Exergie et échanges thermiques

La différence de température entre un réservoir et l'environnement contribue à son exergie. Si l'on considère le transfert thermique  $Q$  entre un réservoir à la température  $T$  et le milieu ambiant à la température  $T_0$ , l'exergie transférée  $X$  est donnée par la relation suivante :

$$X = Q \left| 1 - \frac{T_0}{T} \right|$$

Cette relation peut être considérée comme une généralisation du facteur de Carnot, qui donne le rendement théorique maximum d'un moteur thermique. Le graphique ci-dessous illustre cette relation.

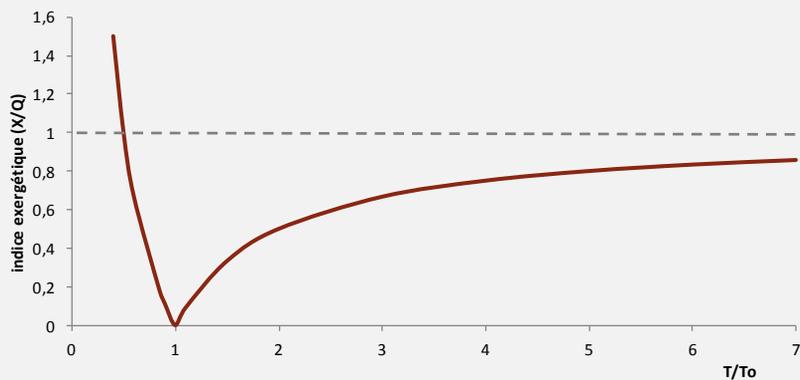


Figure 3 : Indice exergetique en fonction de la température  $T$  d'un réservoir dans un environnement à  $T_0$

Pour des températures élevées, exergie et chaleur tendent à se confondre : plus une source de chaleur est disponible à haute température par rapport à son environnement, plus sa qualité est élevée. C'est pourquoi une source de chaleur à haute température est plus facilement valorisable qu'une source de chaleur à basse température.

Par ailleurs, ce graphique illustre que le « froid » possède un contenu exergetique. D'un point de vue énergétique, un système « froid » est à un niveau d'énergie thermique inférieur à celui de son état d'équilibre : plus la température du système est faible et plus son niveau d'énergie thermique est bas. L'analyse énergétique caractérise donc un système « froid » comme un système déficitaire en énergie par rapport à son environnement. A l'opposé, le point de vue exergetique traduit bien mieux le fait qu'une source « froide » est valorisable.

# ILLUSTRATIONS



## La juste mesure des flux et ressources énergétiques

Les ressources énergétiques disponibles s'avèrent très différentes dans leur forme : combustibles, rayonnements, énergie éolienne, chaleur... Cette diversité des ressources, mais aussi des processus de transformation énergétique, a conduit au développement de diverses métriques spécifiques pour la caractérisation de la ressource énergétique. Ces métriques sont difficilement comparables entre elles : PCI et PCS pour les combustibles, pouvoir méthanogène, pression osmotique...

L'approche exergétique offre un cadre d'analyse permettant de quantifier de manière systématique les ressources énergétiques. En prenant en compte la « qualité » de l'énergie, **l'analyse exergétique permet de comparer des formes d'énergie différentes de façon pertinente.**

Cette approche permet, par exemple, une représentation pertinente des flux et réservoirs énergétiques au niveau planétaire. Le diagramme ci-dessous représente les réservoirs d'exergie, les flux et les destructions d'exergie à l'échelle de la Terre.

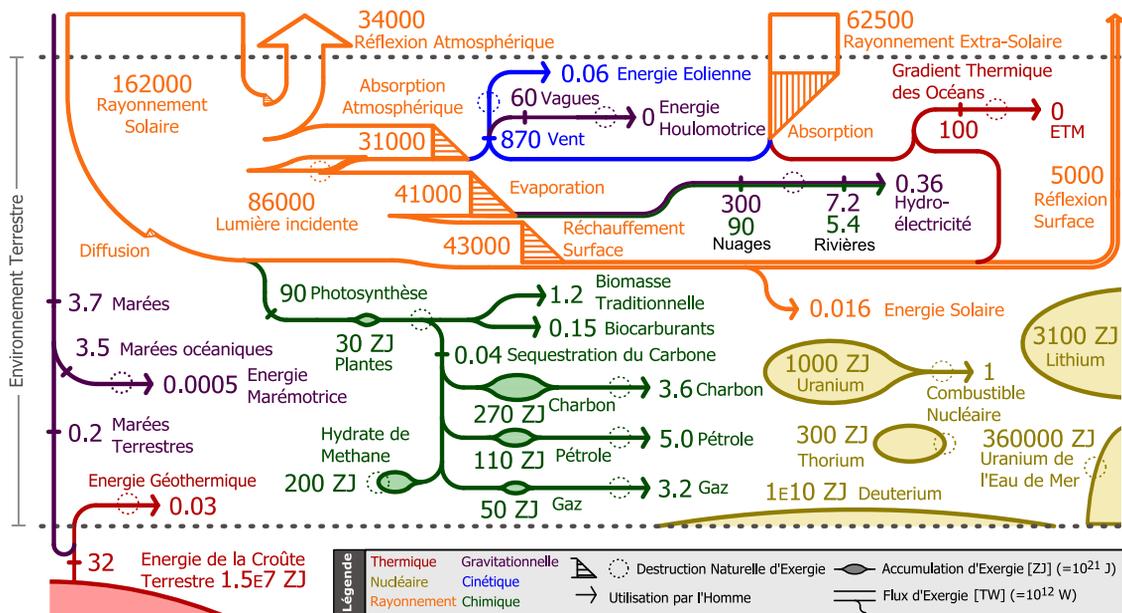


Figure 4 : Réservoirs, flux et destructions d'exergie à l'échelle de la planète (traduit des travaux du GCEP)

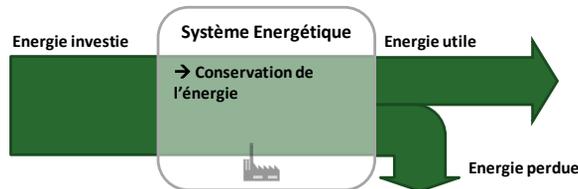
# ILLUSTRATIONS



## La juste mesure de l'efficacité des conversions énergétiques

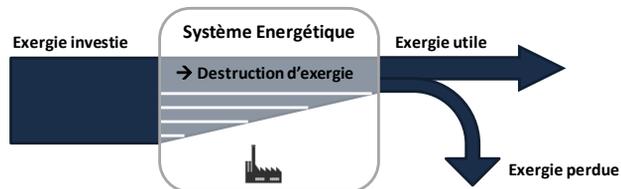
L'efficacité ou rendement énergétique se définit comme le rapport entre l'énergie utile et l'énergie investie dans une transformation ou conversion.

$$\eta_{en} = \frac{\text{Energie utile}}{\text{Energie investie}}$$



L'efficacité ou rendement exergetique se définit comme le rapport entre l'exergie utile<sup>2</sup> et l'exergie investie dans une transformation ou conversion.

$$\eta_{ex} = \frac{\text{Exergie utile}}{\text{Exergie investie}}$$



Contrairement à son pendant énergétique, **la forme exergetique du rendement prend en compte non seulement les flux énergétiques perdus, mais également la diminution de qualité des flux énergétiques.**

Par ailleurs, puisque la notion d'exergie est une mesure de l'énergie « utile » et permet de comparer des flux d'énergie de formes différentes, **le rendement exergetique est universel dans son application et interprétation, et permet de comparer le système considéré avec le meilleur système théoriquement possible** (rendement exergetique de 100%).

Le cas basique mais instructif du chauffage montre l'apport de l'approche exergetique pour la détermination d'efficacité :

Solution technologique	Rendement énergétique	Rendement exergetique
Radiateur électrique	≈ 100%	≈ 7%
Radiateur alimenté par un réseau de chaleur	≈ 100%	≈ 38%
Pompe à chaleur	≈ 300%	≈ 20%

Figure 5 : Comparaison entre rendements énergétique et exergetique pour différentes solutions de chauffage. Seule la conversion finale est prise en compte. Le détail est disponible en annexe.

En effet, si affirmer que l'efficacité énergétique d'un convecteur électrique est égale à 100% est juste en soi, cela donne l'illusion d'un système « parfait », et n'aide pas à la compréhension du fait qu'il existe des systèmes plus efficaces. Par ailleurs, l'efficacité énergétique ne permet pas de distinguer le radiateur alimenté par un réseau de chaleur du radiateur électrique. Enfin une « efficacité » de 300% pour les pompes à chaleur n'aide pas vraiment à jauger l'efficacité intrinsèque de ces systèmes.

Au contraire, le calcul des rendements exergetiques apporte un éclairage sur les performances de ces trois systèmes de chauffage : l'utilisation de convecteurs électriques détruit une quantité très importante d'exergie ; les pompes à chaleur disposent encore d'une marge de progression considérable en termes d'efficacité ; et le radiateur alimenté par un réseau de chaleur apparaît comme le plus efficace des trois systèmes.

<sup>2</sup> Pour faciliter la compréhension, une différence d'ordre pratique est faite ici entre l'exergie détruite et l'exergie perdue (c'est-à-dire détruite lors d'un échange avec l'environnement). D'un point de vue théorique, il s'agit d'une seule et même notion, celle de la destruction d'exergie.

## EXERGIE ET INDUSTRIE

Pour des raisons réglementaires et économiques, mesurer, analyser et optimiser les performances énergétiques des procédés apparaît comme un enjeu de plus en plus crucial pour l'industrie. La notion d'exergie est aujourd'hui encore peu utilisée dans le monde industriel. Néanmoins, sa valeur ajoutée en termes d'optimisation énergétique intéresse de plus en plus d'acteurs.



### Mesurer la performance d'un procédé industriel

Pour optimiser la performance énergétique d'un site industriel, il est nécessaire de pouvoir l'évaluer. Les procédés industriels sont de nature et de complexité variées. De plus, les ressources énergétiques consommées et produites dans l'industrie peuvent se présenter sous des formes différentes : électricité, chaleur... Il est en conséquence relativement difficile de mesurer et comparer la performance énergétique de sites industriels du fait de ces disparités.

Pour mesurer consommations et productions d'énergie, l'industrie a introduit de nouvelles unités telles que les « watt-heures thermiques » ( $Wh_{th}$ ), les « watt-heures électriques ( $Wh_{el}$ ) » ou encore les « tonnes d'équivalent pétrole » (tep), dont la pertinence dépend généralement des formes d'énergie mise en jeu. L'existence de ces différentes unités rend les comparaisons laborieuses.

L'introduction de ces différentes unités de mesure souligne en réalité une volonté de traduire les différentes « qualités » de l'énergie, notion que l'approche exergetique permet justement d'exprimer.

**La notion d'exergie est encore très peu utilisée dans l'industrie pour évaluer production et consommation d'énergie. Pourtant, elle constitue la grandeur pertinente pour mesurer de façon standardisée consommations et productions d'énergie dans l'industrie.**



### L'exemple du secteur Oil & Gas – le cas de l'E&P

Un grand nombre de secteurs industriels ne disposent pas d'indicateur de performance énergétique standard. Le domaine de l'Exploration & Production par exemple affiche une disparité concernant l'évaluation de l'efficacité énergétique des sites. La plupart des majors pétrolières possèdent leurs propres critères de performance énergétique, généralement basés sur l'intensité énergétique – ratio entre l'énergie consommée et la production d'hydrocarbures – de leurs usines. Cependant, la définition exacte de cette intensité énergétique diffère d'un major à un autre : inclusion ou non des gaz de torche dans l'énergie consommée, prise en compte des utilités importées...

Par ailleurs, à niveau de production égal, l'intensité énergétique dépend amplement des caractéristiques du pétrole ou du gaz traités par le site : composition, niveau de pression et température du fluide en entrée d'usine par exemple. Un fluide disponible à basse pression requiert généralement une unité de recompression en entrée d'usine, d'où une augmentation de l'intensité énergétique en comparaison à une usine où le fluide d'entrée est disponible à plus haute pression. Ces paramètres impactent l'intensité énergétique de l'usine mais ne sont pas pris en compte dans les approches énergétiques classiques. Cela rend donc la comparaison de l'efficacité énergétique des différents sites relativement complexe en Exploration & Production.

L'approche exergetique permet d'intégrer ces paramètres « extra-procédés » dans l'analyse de la performance énergétique du site industriel. Elle permet donc théoriquement d'analyser sur une base commune l'efficacité de différents sites industriels, et de comparer des procédés de nature différente entre eux. C'est pourquoi la définition de nouveaux indicateurs de performance énergétique basés sur l'exergie fait actuellement partie des axes de travail de certains industriels.

# EXERGIE ET INDUSTRIE



## Optimiser la performance d'un procédé industriel

L'analyse exergetique, lorsqu'elle est intégrée à une approche systémique, est un outil puissant pour l'optimisation des procédés industriels.

### L'analyse thermique

Les analyses énergétiques sont aujourd'hui relativement répandues dans l'industrie. Une étude menée par ENEA montre que 2/3 des industriels français ont déjà réalisé des audits énergétiques<sup>3</sup>.

Ceux-ci sont principalement basés sur une approche thermique. Il est vrai que la confrontation entre flux chauds et froids constitue un levier potentiel significatif pour l'optimisation de l'efficacité énergétique des procédés : c'est le principe de l'intégration thermique. L'analyse de pincement, qui vise à identifier les échanges de chaleur possibles entre flux chauds (nécessitant d'être refroidis), et les flux froids (nécessitant de la chaleur), est une démarche éprouvée qui permet d'améliorer l'intégration thermique.

### L'analyse exergetique et systémique

Contrairement aux analyses thermiques, les méthodes d'analyse exergetique sont encore peu connues et rarement utilisées par les industriels. Pourtant, l'analyse exergetique permet d'aller plus loin dans l'optimisation énergétique des procédés industriels que l'approche purement thermique sur laquelle reposent les analyses énergétiques traditionnelles.

En effet l'exergie permet, de façon globale et systémique, de localiser et quantifier les inefficiences au sein d'un procédé industriel, en prenant en compte non seulement les pertes d'énergie, mais également les pertes de qualité de cette énergie.

De ce fait, **l'approche exergetique systématise la recherche de technologies et procédés de rupture plus efficaces** (voir le cas d'étude de la turbine à gaz page suivante).

Par ailleurs, ce systématisme de **la métrique exergetique autorise une analyse systémique**, c'est à dire une approche prenant en compte l'ensemble du procédé industriel considéré, et permet ainsi la recherche de l'optimum énergétique global.

<sup>3</sup> Voir à ce sujet l'étude d'ENEA pour le programme TOTAL-ADEME : [L'efficacité Energétique dans l'Industrie : Verrous et Besoins en R&D](#)

# CAS D'ÉTUDE – LA TURBINE A GAZ



## Turbine à gaz simple

D'un point de vue énergétique, l'énergie qui n'est pas convertie en travail par une turbine à gaz est contenue dans les gaz d'échappement.

L'approche exergetique apporte une vision plus juste et plus précise. Elle quantifie bien sûr la perte d'exergie via les gaz d'échappement, mais aussi la dégradation de la qualité de l'énergie (c'est-à-dire la destruction d'exergie) dans chacun des composants de la turbine (cf. figure 6). L'échappement, mais aussi la combustion elle-même apparaissent comme les deux causes principales d'inefficacité.

Pour améliorer le rendement du système, capturer l'exergie perdue est une première piste. C'est le principe du cycle combiné qui valorise l'exergie contenue dans les gaz d'échappement via un cycle vapeur.

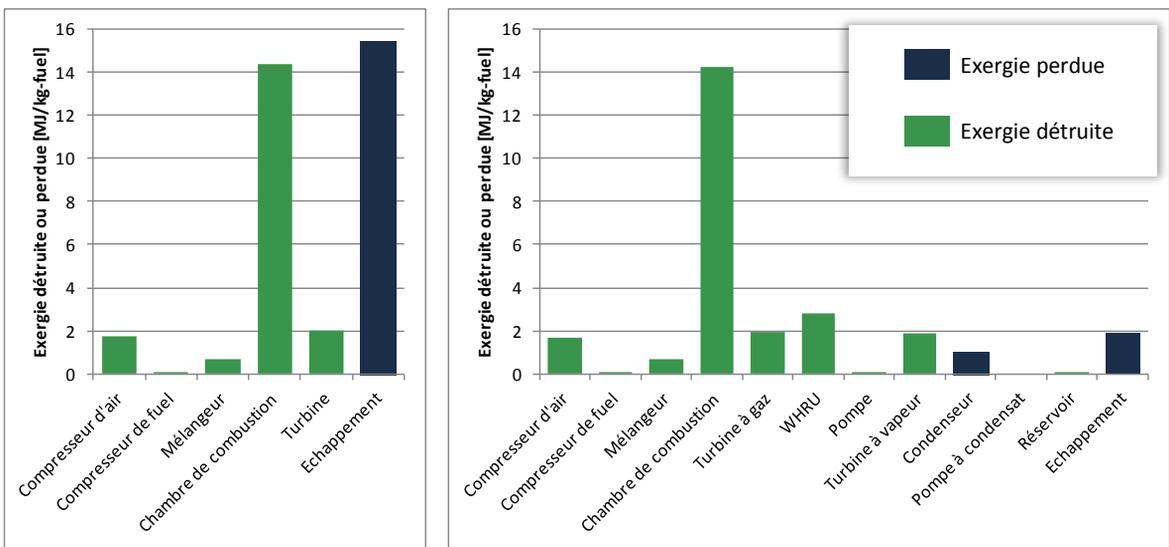


Figure 6 : Comparaison des pertes exergetiques d'une turbine à gaz simple (à gauche) et d'un cycle combiné (à droite). La différence est faite entre exergie perdue et exergie détruite.



## Turbine à cycle combiné et autres pistes d'amélioration

Dans le cas du cycle combiné, le point de vue énergétique indique que l'énergie non convertie en travail est contenue dans les gaz d'échappement et dans le flux de chaleur issue du condenseur. Ce constat, s'il est juste, est insuffisant pour comprendre l'origine des pertes résiduelles et envisager des pistes d'amélioration du système.

L'approche exergetique montre en effet que, dans une turbine à cycle combiné, les pertes d'exergie sont moins importantes que ne le sont les destructions d'exergie : l'exergie détruite par la combustion elle-même est la responsable principale de perte d'efficacité, loin devant les flux d'exergie perdus et les autres flux d'exergie détruite (cf. figure 6).

Pour améliorer le rendement d'un cycle combiné de façon conséquente, il ne s'agit donc plus de capter l'exergie perdue mais bien de travailler à la réduction de la destruction d'exergie lors de la combustion. Des systèmes couplant une pile à combustible SOFC avec des turbines à gaz, ainsi que des systèmes réalisant la combustion dans des conditions plus propices (haute énergie interne), permettent de répondre à cet enjeu, et font l'objet de recherches visant la rupture technologique (voir par exemple les travaux du GCEP).

# L'EXERGIE EN BREF



## Ce qu'il faut retenir

L'exergie mesure l'énergie « utile » qui peut être extraite d'un réservoir ou d'un flux énergétique. Elle constitue un **indicateur de la qualité d'une énergie** donnée et autorise la **comparaison de façon pertinente de formes d'énergie** hétérogènes. Enfin, la notion d'efficacité exergetique donne **une image plus juste de l'efficacité réelle** d'un procédé ou système énergétique, **en quantifiant son rendement par rapport au meilleur système théoriquement possible**.

A ce titre, et par rapport aux approches énergétiques, l'approche exergetique permet aux industriels d'aller plus loin dans l'**optimisation énergétique de procédés industriels**. En effet, cette approche conduit les industriels à une meilleure appréhension de l'efficacité réelle de leurs procédés, et leur permet d'identifier et quantifier les causes d'inefficacité.

Pour les équipementiers, l'approche exergetique systématise la **recherche de technologies de rupture plus efficaces**, en identifiant de manière systémique les gisements d'efficacité.

Pour les pouvoirs publics, l'approche exergetique, en quantifiant la part de l'énergie utile à la société, fournit **la bonne métrique avec laquelle valoriser les flux énergétiques**. C'est bien le kWh d'exergie qui mérite d'être valorisé, et non pas le kWh d'énergie. Par exemple, il serait judicieux d'envisager un tarif de rachat pour de la chaleur renouvelable ou de la chaleur fatale sur une base exergetique (et donc intégrant de façon juste la question de la température) plutôt que sur une base énergétique.

Ainsi, l'exergie représente **la métrique efficace et adaptée à la compréhension et à la prise en compte des enjeux énergétiques** pour l'ensemble des acteurs impliqués dans la transition énergétique.

### POUR EN SAVOIR PLUS :

Göran Wall : [Exergetics](#)

GCEP (Global Climate & Energy Project, Stanford University) : [Global Exergy Resource Chart](#)

GCEP (Global Climate & Energy Project, Stanford University) : [Low Exergy Loss Chemical Engines](#)

Auteurs : Loïc RAKOTOJAONA, Olivier LACROIX  
[contact@enea-consulting.com](mailto:contact@enea-consulting.com)



## ANNEXE – L'EFFICACITÉ DU CHAUFFAGE

Considérons trois solutions de chauffage permettant de maintenir l'intérieur de locaux à une température de  $T=20^{\circ}\text{C}$ , avec une température extérieure de  $T_0=0^{\circ}\text{C}$  : un radiateur électrique, un radiateur alimenté par un réseau de chaleur et une solution mettant en jeu une pompe à chaleur (PAC).



### Le radiateur électrique

Soit  $W_{el}$  l'énergie électrique consommée par le radiateur, et  $Q_{out}$  la chaleur fournie par le radiateur à la pièce. L'énergie électrique est entièrement convertie en chaleur, c'est-à-dire  $Q_{out} = W_{el}$ . Le rendement énergétique est donc de 100% :

$$\eta_{en} = \frac{Q_{out}}{W_{el}} = 100\%$$

D'un point de vue exergetique, l'exergie investie  $X_{in}$  est exactement égale à l'énergie investie  $E_{in}=W_{el}$ , puisqu'il s'agit d'énergie électrique (cf. Figure 1). Quant à l'exergie récupérable  $X_{out}$ , elle est équivalente au travail maximum que peut fournir la chaleur produite par le radiateur. Le rendement exergetique du radiateur est donc :

$$\eta_{ex} = \frac{X_{out}}{X_{in}} = \frac{Q_{out} \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)}{W_{el}} = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \approx 7\%$$

Du point de vue de l'exergie, un radiateur électrique a une très faible efficacité contrairement à ce que laisse entendre l'approche purement énergétique. En effet, un radiateur électrique dégrade de l'énergie de très haute qualité pour produire de la chaleur de basse qualité. Cette forte dégradation de la qualité de l'énergie n'est pas visible dans l'analyse énergétique qui ne tient compte que des quantités d'énergie.



### Le radiateur alimenté par un réseau de chaleur

Le réseau de chaleur considéré pour cette analyse est un réseau de chaleur disponible à  $T_{res}=60^{\circ}\text{C}$ . Si l'on note  $Q_{in}$  la chaleur fournie par le réseau de chaleur au radiateur, on obtient pour l'approche énergétique :

$$\eta_{en} = \frac{Q_{out}}{Q_{in}} = 100\%$$

Le rendement exergetique est donné par la relation suivante :

$$\eta_{ex} = \frac{X_{out}}{X_{in}} = \frac{Q_{out} \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)}{Q_{in} \left(1 - \frac{T_0}{T_{res}}\right)} = \frac{\left(1 - \frac{T_0}{T}\right)}{\left(1 - \frac{T_0}{T_{res}}\right)} \approx 38\%$$

Alors que l'approche énergétique ne permet pas de distinguer l'efficacité d'un radiateur électrique et celle d'un radiateur alimenté par un réseau de chaleur, l'approche exergetique met en relief des différences d'efficacité notables entre ces deux systèmes. Le chauffage électrique s'avère beaucoup moins efficace que le réseau de chaleur car pour un même usage, il dégrade une énergie de qualité supérieure.

## ANNEXE – L'EFFICACITÉ DU CHAUFFAGE



### La pompe à chaleur

Considérons maintenant une solution de chauffage par pompe à chaleur (PAC). L'efficacité énergétique d'une telle solution est estimée via le Coefficient de Performance (COP), et est égale au ratio entre la chaleur fournie par le système  $Q_{out}$ , et le travail fourni au système  $W_{el}$  (par le biais du compresseur). Le flux d'énergie tiré de l'environnement n'est pas pris en compte en tant qu'énergie investie, car elle ne « coûte rien ». Le COP est généralement de l'ordre de 300% ou plus en fonction de la performance de l'équipement.

$$COP_{en} = \frac{Q_{out}}{W_{el}} \approx 300\%$$

Le rendement exergetique quant à lui prend bien en compte le flux d'énergie  $Q_{in}$  tiré de l'environnement à la température  $T_0$  du milieu. Le fait que cette énergie ne « coûte rien » s'exprime dans le calcul par une exergie associée nulle. Le rendement exergetique est donc

$$\eta_{ex} = \frac{X_{out}}{X_{in}} = \frac{Q_{out} \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)}{W_{el} + Q_{in} \left(1 - \frac{T_0}{T_0}\right)} = \frac{Q_{out} \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)}{W_{el}} = COP_{en} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \approx 20\%$$

L'analyse exergetique de la PAC montre l'intérêt du concept pour exprimer un rendement. Alors que COP ne donne en fait aucune indication sur la performance intrinsèque de la PAC, l'approche exergetique met en évidence la marge de progression.

# ANNEXE – THÉORIE THERMODYNAMIQUE



## Expression de l'exergie

L'exergie est une grandeur permettant d'évaluer le travail maximum que peut fournir un système lorsqu'il se met en équilibre thermodynamique avec son environnement.

Le système est caractérisé par une température  $T$  (en K), une pression  $P$  (en bars), des potentiels chimiques  $\mu_i$  (en  $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$ ), ainsi que par une énergie interne  $U$  (en J), un volume  $V$  (en  $\text{m}^3$ ), une entropie  $S$  (en  $\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$ ), et les quantités de matière des différents éléments  $n_i$  (en moles). De même le milieu ambiant est caractérisé par  $T_0$ ,  $P_0$ ,  $\mu_{i0}$ ,  $U_0$ ,  $V_0$ ,  $S_0$ ,  $n_{i0}$ .

Si  $\Delta S^{tot}$  est la création maximale d'entropie résultant de la mise en équilibre du système avec son environnement, l'exergie d'un système dans son environnement est donnée par la relation suivante :

$$X = T_0 \Delta S^{tot}$$

Si  $U_{eq}$ ,  $V_{eq}$ ,  $S_{eq}$  et  $n_{ieq}$  sont l'énergie interne, le volume, l'entropie, et les quantités de matière des différentes espèces chimiques une fois le système mis en équilibre avec son environnement, l'équation suivante est une forme utile pour la détermination de l'exergie d'un système :

$$X = U - U_{eq} + P_0(V - V_{eq}) - T_0(S - S_{eq}) - \sum_i \mu_{i0} (n_i - n_{ieq})$$

## Nous sommes



Une société de conseil indépendante, créée en 2007, agréée organisme de recherche et de formation.

Une équipe de 25 personnes aux parcours complémentaires : dirigeants de l'industrie, spécialistes de l'énergie et du développement durable, entrepreneurs, ingénieurs procédés.

### Nos clients

- Producteurs et distributeurs d'énergie
- Industriels et consommateurs d'énergie
- Investisseurs
- Ingénieries, équipementiers et développeurs de technologies
- Institutionnels et acteurs sociaux



CORPORATE



OPERATIONS

## Offres de services



- Prospective énergie, environnement, société
- Stratégie énergie et développement durable
- Filières émergentes et nouveaux marchés
- R&D, Innovation et Investissement
- Gestion des ressources et optimisation énergie
- Expertise & formation

## Expertises thématiques



- Efficacité énergétique et valorisation de déchets
- Biogaz, bioénergies et biocarburants
- Energies nouvelles et CCS
- Stockage d'énergie et hydrogène
- Acceptabilité sociale et parties prenantes
- Accès à l'énergie et précarité énergétique

## Notre engagement



Contribuer à l'accès à l'énergie pour tous :

- 1 500 jours de mécénat – 45 missions – 18 pays
- 25 partenaires – 15 études diffusées librement
- Un programme de R&D sur la mesure d'impact