

Résumé de la formation « L'énergétique »

Réalisé par

Laurent Jodoin, ing. jr

Juin 2006

Résumé de la formation « L'énergétique »

Résumé de la formation « L'énergétique »	1
Introduction	3
Notions préliminaires	3
Chaleur	3
Force	3
Énergie et travail	4
Puissance	4
Thermodynamique	4
Efficacité énergétique	5
Exergie	6
Présentation	6
Description	6
Démonstration	7
Interprétation	8
Études de cas	9
Cycle énergétique	9
Maison individuelle	9
Conclusion	10
Bibliographie	10

Introduction

« Rien ne se perd, rien ne se crée » disait Lavoisier. N'est-ce pas une façon simple de formuler le principe de causalité si chère, voire indispensable, aux sciences naturelles ? En effet, dire que tout événement, comme effet, possède une cause, c'est bien dire que *quelque chose* l'a produit, en est à l'origine – ce *quelque chose*, peu importe de quoi il s'agit pour l'instant, étant l'opposé de ce « rien ». En d'autres termes, ce principe interdit des phénomènes *ex nihilo*, soit *apparaissant de nulle part*. Car, il est évidemment insatisfaisant d'expliquer un phénomène par la simple raison de la spontanéité.

Depuis près de deux siècles, les sciences physiques rendent compte de ce principe par le concept d'*énergie*. Celui-ci est particulièrement commode puisque l'énergie se conserve; de sorte que l'évolution d'un système est plus aisée à déterminer. Par contre, cette approche est quelque peu simpliste, surtout dans les cas où l'on cherche à accomplir un travail utile ou si l'on s'attarde à l'environnement « global » du système étudié. Il y a lieu de considérer alors le fameux vers de Ronsard : « La matière demeure, mais la forme se perd ».

L'énergie est considérée comme la forme potentielle du travail : *une fois l'énergie dépensée, le travail est accompli*. C'est pourquoi après une journée de travail nous n'avons plus d'énergie! Celle-ci possède plusieurs *formes* : mécanique, électrique, cinétique, potentielle, chimique, etc. Ainsi, l'énergie est transformée d'une forme à l'autre sans jamais se perdre ou se créer. Cela revient à dire que l'univers est fermé; autrement dit, toute la matière (équivalente à l'énergie à une constante près selon la fameuse équation d'Einstein $E=mc^2$) était déjà contenue à l'*origine* (ou si l'on veut depuis le *Big Bang*) et elle ne fait qu'évoluer en qualité, non en quantité. Certains thermodynamiciens parlent de formes *inférieures* et *supérieures* de l'énergie en fonction du travail qui peut en être tiré. Mais ces transformations, ces échanges, ne se font pas dans tous les sens et sans égard à l'environnement immédiat, c'est-à-dire du milieu ambiant.

Notions préliminaires

Chaleur

Le concept de chaleur est hautement lié à celui d'énergie et de vitesse. En effet, on peut aisément considérer la chaleur comme l'effet macroscopique de la vitesse de déplacements des molécules de la substance considérée; en d'autres termes, il s'agit de l'énergie cinétique de chacune des molécules. Il est utile de noter que la chaleur se déplace toujours du chaud vers le moins chaud – le froid n'existant pas comme tel. La température est arbitraire dans ce sens où elle est exprimée en fonction du comportement d'une substance étalon; l'exemple le plus commun étant celui du mercure et de l'eau. La limite inférieure de la température, le *zéro absolu*, estimé à -273,15 degrés Celsius (ou 0 degré Kelvin), correspond à une substance dont les molécules n'ont aucun mouvement intrinsèque. Il y a également une limite supérieure, la *température de Planck*, totalement inimaginable et correspondant au premier instant de l'univers dans le scénario du *Big Bang*, et équivaut à 142×10^{30} degrés Kelvin (pour les néophytes cela correspond à 142 suivi de 30 zéros; pour les curieux cela correspond à un ordre de grandeur indicible, mais pour la forme on peut dire qu'il s'agit de 142 millions de yottadegrés Kelvin !). Par ailleurs, il y a trois types d'échange thermique :

- la conduction (de solide à solide) qui se calcule d'après $q_{cond} = \Delta T / R$, où ΔT est l'écart de température entre les deux surfaces et R est la résistance thermique;
- la convection (de solide à fluide ou de fluide à fluide) qui se calcule d'après $q_{conv} = h(T_s - T_a)$, où h est un coefficient convectif difficile à déterminer, T_s la température de la surface et T_a la température du fluide;
- la radiation (de solide à solide) – car tout corps (à part les corps au zéro absolu) émet des radiations – qui se calcule d'après $q_{rad} = \epsilon(T_s^4 - T_{sur}^4)$, où ϵ et σ sont des constantes, T_s la température de la surface et T_{sur} la température de la surface d'échange ou ambiante.

Unités : [SI] °C ou °K; [GB] °F

Force

Une force est davantage un concept qu'une entité physique. Ce concept est intimement lié à celui d'énergie. En fait, il a été créé afin d'expliquer les changements d'énergie – bien qu'historiquement il fut d'abord utilisé par Aristote, par exemple, ou

encore Newton. Ce dernier s'est aperçu que la force était égale à la masse multipliée par l'accélération, soit $F = m \times a$. Dans la mécanique newtonienne, la somme des forces s'appliquant sur un corps au repos ou se déplaçant à vitesse constante sera nulle. (Dans la relativité einsteinienne, la masse varie avec la vitesse, mais c'est une autre histoire...) Ainsi, le poids d'un corps quelconque au repos est déterminée par sa masse (invariable et exprimée en kg dans le SI) multipliée par l'accélération gravitationnelle (environ 9.81 m/s^2 à notre latitude); de sorte que, en situation simple, seules deux forces égales et opposées (donc d'une somme nulle) s'appliqueront sur lui, soit la force de son propre poids et la force du sol « réagissant ». Il est utile de noter qu'un couple se détermine par une force multipliée par le bras de levier et s'exprime donc en Nm.

Unités : [SI] $N = \text{kg} \cdot \text{m/s}^2$; [GB] lbf (livre force) = $32.2 \times \text{lbf}$ (livre masse)

Énergie et travail

Tel que mentionné précédemment, l'énergie est considérée comme la forme potentielle du travail : *une fois l'énergie dépensée, le travail est accompli*. C'est pourquoi les unités utilisées pour exprimer le travail et l'énergie sont les mêmes, soit le joule (J). Le cas de l'énergie mécanique est relativement simple : en supposant que la friction et la résistance de l'air sont négligeables, pour soulever une masse de 1 kg , soit 9.81 N , verticalement sur 1 m , une énergie de $9.81 \text{ N} \times 1 \text{ m} = 9.81 \text{ J}$ est nécessaire et, par conséquent, le travail effectué une fois la masse soulevée sera aussi de 9.81 J . Pour ceux qui ont suivi, vous comprenez que ce calcul ne tient pas compte de l'énergie intrinsèque du système ou l'énergie de masse – selon $E=mc^2$ – puisqu'elle reste inchangée. Sans entrer dans les détails, voici quelques « formes » de l'énergie :

- Énergie cinétique = $\frac{1}{2} \text{ masse} \times (\text{vitesse})^2$ (translation) = $\frac{1}{2} \text{ moment d'inertie polaire} \times (\text{vitesse angulaire})^2$ (rotation);
- Énergie potentielle = $\text{masse} \times \text{accélération gravitationnelle} \times \text{hauteur} = \frac{1}{2} \times \text{constante d'élasticité} \times (\text{position})^2$;
- Énergie chimique = *enthalpie* = *énergie interne* + (*pression* \times *volume*)
- Énergie thermique = *chaleur spécifique* \times *température*;
- Énergie électrique = *charge* \times *différence de potentiel électrique* ou *voltage*;
- Énergie de masse = $\text{masse} \times (\text{vitesse de la lumière})^2$ (corps au repos dans la mécanique relativiste).

Ainsi, par exemple, si l'on suppose une masse à un mètre du sol qu'on laisse tomber, l'énergie potentielle de par sa position se transformera graduellement en énergie cinétique jusqu'à atteindre un maximum (et un minimum d'énergie potentielle) lorsqu'elle atteindra le sol, et alors l'énergie cinétique sera transformée à son tour en déformation (énergie potentielle élastique) et en chaleur.

Unités : [SI] $J = \text{N} \cdot \text{m} = \text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2$; [GB] BTU (British Thermal Unit) ou cal

Puissance

La puissance est une quantité d'énergie par unité de temps; dans le SI il s'agit de joules par seconde (J/s) ou des watts (W). Aussi bien que l'énergie, la puissance peut s'exprimer de plusieurs façons :

- Puissance mécanique = *force* \times *vitesse* = *couple* \times *vitesse de rotation*;
- Puissance électrique = *tension* ou *voltage* \times *courant* ou *ampérage* (en courant continu);
- Puissance hydraulique = *pression* \times *débit*.

Unités : [SI] $W = \text{J/s} = \text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^3$; [GB] BTU/h

Thermodynamique

En première approche, la thermodynamique peut se définir comme la science du travail et de la chaleur en relation avec les substances s'y rapportant. En seconde approche, elle peut se définir comme la science de l'énergie et de l'entropie.

PREMIER PRINCIPE DE LA THERMODYNAMIQUE. Ce principe « stipule que, pendant tout cycle que décrit un système, l'intégrale de contour fermé de la chaleur est proportionnelle à l'intégrale de contour fermé du travail »¹. Cela signifie que la quantité nette de chaleur échangée pendant un cycle est égale au travail net effectué pendant le cycle et ce, à une constante près. Il s'agit du *principe de conservation de l'énergie*. Mathématiquement : $\oint \delta Q = \oint \delta W$, où Q représente la chaleur, E l'énergie du système et W le travail fourni.

SECOND PRINCIPE DE LA THERMODYNAMIQUE. Le second principe s'énonce difficilement et a une portée quasi métaphysique dans ce sens où il implique une *flèche du temps*. En substance, il indique que les évolutions se font dans un sens et non

¹ VAN WYLEN, SONNTAG, DESROCHERS, *Thermodynamique appliquée*, ERPI, 1992; p. 86.

dans l'autre. Par exemple, un corps chaud peut céder de chaleur à un corps froid, mais pas l'inverse. Il est lié à la notion d'*entropie*, qui est en quelque sorte une mesure du désordre dans le système macroscopique (par rapport à son état initial et final), ou encore au manque d'information sur son état microscopique. Celle-ci ne peut que croître dans le temps. Il s'agit du *principe de dégradation de l'énergie*. Mathématiquement : $S_2 - S_1 \geq \int_1^2 Q_2 / T$, où S représente l'entropie et T la température.

TROISIÈME PRINCIPE DE LA THERMODYNAMIQUE. Quoique de moindre importance dans notre propos, le troisième principe « stipule essentiellement que l'entropie d'un cristal parfait est nulle au zéro absolu »². Cela signifie que la structure cristalline à un niveau d'ordre maximale et qu'à cette température l'énergie thermique est minimale. Cela signifie aussi que l'enthalpie d'un tel système est nulle. L'enthalpie est la somme de l'énergie interne et de l'énergie élastique (produit de la pression et du volume) du système; elle est indépendante de l'évolution du système, c'est pourquoi seule la variation d'enthalpie est utilisée.

Efficacité énergétique

En analyse énergétique, tout repose sur l'équivalent chaleur. Autrement dit, chaque forme d'énergie est traduite en énergie selon la quantité potentielle d'énergie thermique disponible. Par exemple, l'énergie électrique d'un système est déterminée en fonction de la quantité de chaleur qu'il peut produire, ce qui n'est pas nécessairement souhaitable, c'est-à-dire qu'il ne s'agit pas nécessairement de la forme d'énergie sous laquelle on désire la convertir.

L'efficacité peut se définir comme la « capacité de produire le maximum de résultats avec le minimum d'effort, de dépense »³. L'efficacité ne peut être définie que si un objectif, un but est fixé. Alors la définition technique peut être utilisée, à savoir ce qui est « produit » par le système divisé par ce qui est « donné » au système; ou ce qui « sort » sur ce qui « entre ». En thermodynamique, l'efficacité (ou le rendement) est la plupart du temps calculé en fonction du travail maximal théorique.

Par exemple, en divisant l'énergie chimique contenu dans un carburant par l'énergie mécanique produite à la sortie d'un moteur à combustion, on obtient son efficacité (ou son rendement). Mais, évidemment, il n'y a pas d'énergie qui ce soit perdu au sens propre, celle-ci s'est seulement transformée en énergie inutilisable, en chaleur par exemple. Cette façon de calculer peut mener à des contradictions apparentes telles des rendements supérieurs à 1 ou 100%.

Autre exemple, on calcule le rendement ou l'efficacité d'une thermopompe en fonction d'une entrée déterminée par l'énergie électrique (réseau électrique) et d'une sortie déterminée par la chaleur provenant de l'extérieur additionnée à celle de l'appareil de chauffage comme tel (généralement une fournaise électrique); autrement dit, la chaleur provenant de l'extérieur n'est pas comptabilisée dans l'entrée du système puisqu'elle n'est pas *payée* par l'utilisateur de la thermopompe, et c'est pourquoi son rendement est supérieur à 100%.

Dernier exemple, l'isolation thermique d'une maison avec de l'isolant permet de conserver l'énergie, en l'occurrence la chaleur des appareils de chauffage, à l'intérieur de ladite maison. D'une part, le transfert thermique est seulement ralenti, en ce sens où la chaleur est toujours diffusée vers l'extérieur, mais à une vitesse moindre. D'autre part, si l'on considère ce qui entre et ce qui sort du système, en l'occurrence la maison, évidemment l'on obtient la valeur de 1 ou 100%, car, une fois de plus, le principe de la conservation de l'énergie s'applique; mais si l'on considère la quantité de chaleur nécessaire pour chauffer la maison, il est certain que l'on constatera une amélioration de l'efficacité énergétique.

Mais l'énergie produite correspond davantage au travail utile, ce qui veut dire que nous ne tenons compte uniquement du travail qui peut être utilisé dans le cadre d'un certain objectif. Autrement dit, il importe de fixer les entrées et les sorties du système. Le système peut avoir plusieurs entrées et/ou plusieurs sorties. Ses limites peuvent être fixes ou variables; par exemple, une maison ou un fluide en écoulement.

² *Ibid.*, p. 544.

³ *Le Petit Robert*, p. 839.

Exergie

Présentation

Tel que présenté précédemment, l'énergie se conserve et se transforme. Ainsi, une unité d'énergie thermique équivaut à une unité d'énergie électrique. Toutefois, en analyse énergétique, comme c'est le cas de l'efficacité énergétique, des choix sont nécessaires aux interprétations. Par conséquent, la subjectivité d'une telle méthode est source de polémiques.

C'est Georges Gouy qui, en 1889, a défini la notion d'*énergie utilisable* rebaptisée depuis *exergie*. Bernard Bruhnes a écrit en 1909 un ouvrage s'intitulant *La dégradation de l'énergie* qui traite de la l'aspect proprement qualitatif de l'énergie, soit son irréversibilité. « Un peu tombée en désuétude, malgré son utilisation par Albert Einstein, elle revient « sur le marché », par le biais ingénieur des réflexions sur le *Gaspillage*, lors des années 70, suivant le choc pétrolier. En effet, il s'agit de mesurer le degré d'irréversibilité d'une transformation non cyclique dans un environnement de température T_0 . »⁴

Tel que mentionné précédemment, les unités d'énergie et de travail sont les mêmes. Toutefois, cette unification a engendré des ambiguïtés au niveau de la compréhension. « Pour compliquer les choses encore plus, l'unité de mesure de l'exergie est aussi le Joule, on peut parler de Joule ici comme unité de travail potentiel. Cela simplifie les travaux et les analyses mais augmente d'un cran les aspects incompréhensibles de l'énergétique. Pour certains cas il y a équivalence entre exergie et énergie, par exemple pour l'électricité, des différences plus subtiles existent pour d'autres formes d'énergie comme l'exergie chimique et de grandes différences existent si l'on compare l'énergie de la chaleur et l'exergie de la chaleur. »⁵

Description

L'exergie est une fonction d'état⁶ très particulière car elle est la somme de deux fonctions d'état d'unités différentes. Cette fonction dépend de la température, de la pression et de la composition chimique. À l'instar de l'énergie, il y a différentes formes d'exergie : mécanique, thermique, chimique, etc. Au sens physique, elle s'exprime de la façon suivante :

$$Ex = \Delta H - T_0 \Delta S = (H - H_0) - T_0(S - S_0)$$

où l'indice 0 représente l'état de référence (ou du milieu ambiant), H l'enthalpie, S l'entropie et T la température.

Or, selon le second principe de la thermodynamique, l'entropie d'un système ne peut que croître ; ce qui signifie que ΔS est toujours positif, et l'exergie Ex décroît dans le temps. En d'autres mots, l'exergie représente la part d'irréversibilité dans l'évolution d'un système. Plus concrètement, il est plus facile de convertir un mouvement en chaleur que de la chaleur en mouvement. Par exemple, il est plus facile de faire du feu à partir du choc de pierres de silex que déplacer une voiture par un moteur à combustion. Ce n'est pas un problème de conception de nos machines, mais c'est plutôt le « monde qui marche en ce sens ».

L'exergie est en quelque sorte le travail utile pouvant être tiré d'un système. C'est pourquoi elle diminue sans cesse dans un système fermé et pourquoi elle doit être déterminée en fonction de la répartition des températures. « Dans l'énergie qui possède un système isolé, livré à lui-même, il y a *quelque chose* qui se perd [...] Ce *quelque chose*, c'est l'énergie utilisable ; ce qui diminue sans cesse, c'est la fraction de l'énergie totale susceptible de servir à quelque chose. »⁷ D'où l'absurdité de parler d'un rendement supérieur à 100%.

⁴ www.wikipédia.com

⁵ BERTHIAUME, Richard, *L'énergétique*, formation continu, Université Laval, 2006.

⁶ « Une fonction d'état est une fonction qui ne dépend *que* de l'état d'un système; en particulier, la valeur de la fonction ne dépend pas de la *manière* avec laquelle on est arrivé à cet état. Sa variation au cours d'une transformation du système thermodynamique ne dépend que de l'état final et de l'état initial d'équilibre. Pour être plus précis : le terme *fonction* désigne un nombre associé à un système ; l'*état* est défini par un ensemble de paramètres utilisés pour décrire le système : pression, température, volume, quantité de matière, etc. », www.wikipédia.com

⁷ BRUNHES, Bernard, *La dégradation de l'énergie*, Champs-Flammarion, 1909; p. 37.

Démonstration

Grosso modo, la notion d'exergie et d'irréversibilité repose sur l'existence d'une source de chaleur (T_0 , simplement supérieure au zéro absolu) dite « gratuite » aux limites du système – ce qui en pratique est toujours le cas. De plus, elle prend en compte le fait (parfois contesté) que l'énergie se dégrade, tel que mentionné précédemment, ou encore, qu'il y a une part d'irréversibilité dans l'évolution d'un système.

Soit un système fermé effectuant un travail à partir de deux sources de chaleur, l'une chaude à une température T_C et l'autre froide à T_0 – car, rappelons-le, il y a transfert thermique *que* lorsqu'il y a différence de température. On suppose par ailleurs qu'il n'y a pas d'échanges massiques ni de variations d'énergies cinétique et potentielle. Ainsi, de par le premier principe de la thermodynamique,

$${}_1Q_2 = E_2 - E_1 + {}_1W_2$$

et selon le second principe,

$$S_2 - S_1 \geq {}_1Q_2 / T$$

l'on peut déterminer le travail réversible par

$$W_{rev} = T_0 (S_2 - S_1) - (E_2 - E_1) + {}_1Q_2(1 - T_0/T_C)$$

En effet, puisqu'il s'agit d'une évolution réversible, $S_2 - S_1 = {}_1Q_2 / T$. Il s'agit du travail maximal que l'on peut récupérer pour effectuer une tâche quelconque; le reste étant perdu en chaleur inutilisable et en accroissement d'entropie – l'un impliquant l'autre. Cette partie inutilisable est l'irréversibilité (ou travail non compensé) et représente la différence entre le travail utile ${}_1W_2$ effectué par le système, c'est-à-dire celui effectivement réalisé, et le travail réversible W_{rev} , soit

$${}_1I_2 = W_{rev} - {}_1W_2$$

et

$${}_1I_2 = [T_0 (S_2 - S_1) - (E_2 - E_1) + {}_1Q_2(1 - T_0/T_C)] - [{}_1Q_2 - (E_2 - E_1)] = T_0 (S_2 - S_1) - {}_1Q_2(T_0/T_C)$$

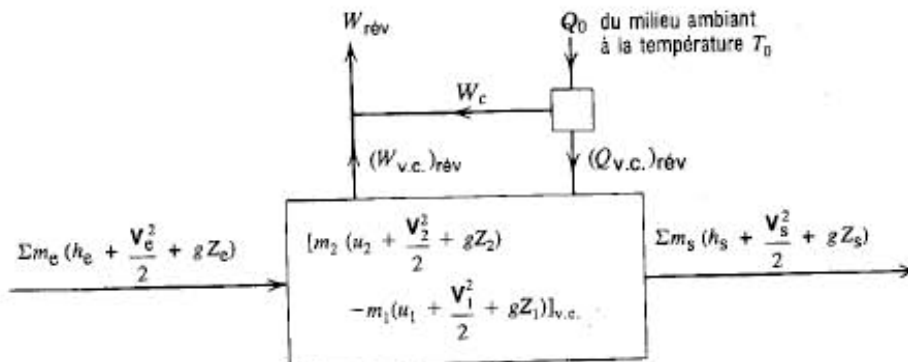
L'irréversibilité représente bien de l'énergie, mais celle-ci est justement inutilisable et c'est pourquoi elle n'est pas prise en compte dans le calcul de l'exergie, ou plutôt, elle est considérée comme négative de sorte qu'elle est soustraite du travail potentiel ou réalisable⁸.

Si l'on considère maintenant un système ouvert en régime permanent, il est possible de généraliser l'équation de l'exergie en tenant compte des variations d'énergies cinétique et potentielle par :

$$Ex = \Delta H - T_0 \Delta S = (H_2 - H_1) - T_0(S_2 - S_1) = {}_1W_2 + {}_1Q_2(1 - T_0/T_C) - {}_1I_2 - (m(V_2^2 - V_1^2) / 2) - mg(Z_2 - Z_1)$$

où V est la vitesse et Z la hauteur.

Voici le schéma d'une évolution réversible (tiré de VAN WYLEN, SONNTAG, DESROCHERS, *Thermodynamique appliquée*, ERPI, 1992; p. 279)



⁸ Certaines équations ici ne sont pas démontrées par souci de simplicité.

Prenons l'exemple d'un système qui reçoit de la chaleur et effectue un certain travail comme le déplacement d'un piston à l'horizontal. En considérant l'état initial 1 lorsque le piston commence à recevoir de la chaleur et l'état final 2 lorsque le piston a terminé sa course, les variations d'énergie cinétique et d'énergie potentielle sont nulles; nous avons par conséquent :

$$\begin{aligned}Ex &= \Delta H - T_0 \Delta S = (H_2 - H_1) - T_0(S_2 - S_1) = {}_1W_2 + {}_1Q_2(1 - T_0/T_C) - {}_1I_2 \\(H_2 - H_1) - T_0(S_2 - S_1) &= {}_1W_2 + {}_1Q_2(1 - T_0/T_C) - T_0(S_2 - S_1) - {}_1Q_2(T_0/T_C) \\H_2 - H_1 &= {}_1W_2 + {}_1Q_2 \\(H_2 - H_1) - {}_1Q_2 &= {}_1W_2\end{aligned}$$

De sorte que le travail fourni par le piston est égale à la variation d'enthalpie – qui ne dépend, rappelons-le, que de l'énergie interne, de la pression et du volume – moins la chaleur fournie au système. Ainsi, le travail maximum réalisable n'est rien d'autre que la différence d'exergie totale.

Interprétation

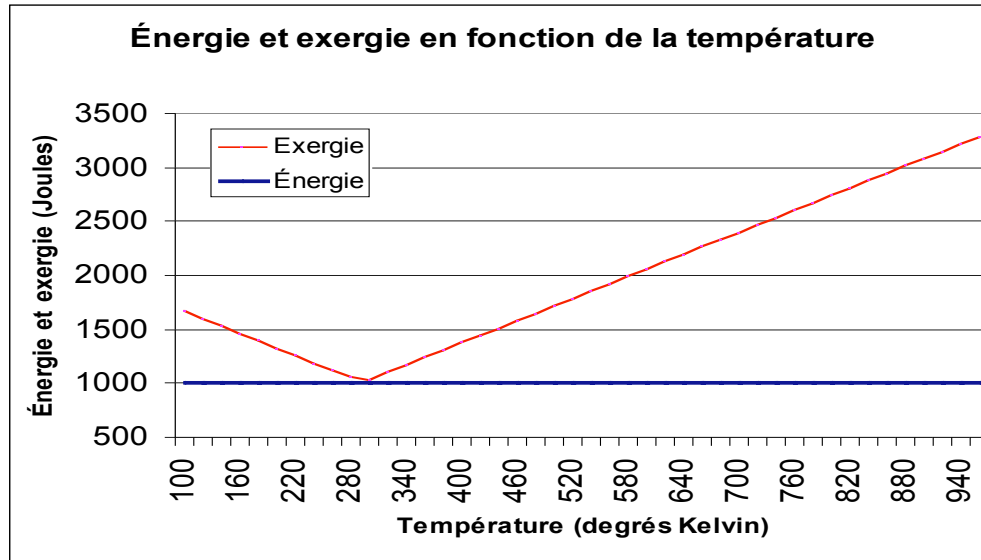
Si l'énergie se conserve sans que *rien* ne se perd, alors nul besoin de se soucier de l'épuisement des ressources dites non renouvelables. Ce que la notion d'exergie laisse entendre, c'est que quelque chose se perd effectivement, et c'est le potentiel de travail utile; perte décrite par l'irréversibilité.

Pour les plus habitués, le rendement exergétique d'une machine peut être déterminé sur un diagramme température-entropie comme le rapport entre la surface du cycle réel à la surface du cycle de Carnot fonctionnant aux mêmes températures de sources chaudes et froides.

Comme cela est peu intuitif, il n'est pas déraisonnable d'interpréter cette notion de plusieurs façons possibles. D'abord, si l'on chute énergétiquement d'un état A désordonné vers un état B ordonné – fortement lié à la température –, il faut payer le prix de l'information gagnée (soit $T_0(S_2 - S_1)$), on ne pourra récupérer que moins que $(H_2 - H_1)$ puisque l'entropie ne peut que croître naturellement. Ensuite, si au contraire A est ordonné et B désordonné, il est possible de récolter davantage que $(H_2 - H_1)$. Aussi, si l'on monte énergétiquement d'un état A désordonné vers un état ordonné, il va falloir payer le prix fort : non seulement $W > \Delta U > 0$, mais plus encore, $W > \Delta U +$ le prix de l'info à payer $T_0(S_2 - S_1)$ qui est positif. Par contre, si l'on monte énergétiquement d'un état ordonné vers un état désordonné, on aura à payer moins que $\Delta U > 0$ d'une quantité $T_0(S_2 - S_1)$, négative. Il se pourrait même que l'on récupère du travail dans l'opération, si B est très désordonné : voilà qui n'était pas *a priori* intuitif : certaines piles au mercure et calomel réalisent cet apparent prodige. « Dès que l'on a pris conscience que récupérer de l'information chaude coûte cher, tout devient assez raisonnable. »⁹

En analyse énergétique, tel que mentionné précédemment, l'énergie d'un système est calculée par rapport à l'équivalent chaleur et ce, sans égard au milieu ambiant dudit système. Toutefois, si l'on s'intéresse au travail pouvant être fourni par le système, cette analyse reste muette. En effet, la chaleur (et donc l'énergie) se diffuse naturellement du froid vers le chaud. Or, cet échange est d'autant plus grand que l'écart de température est élevé. Pour en tenir compte, l'analyse exergétique utilise le facteur de Carnot, $|1 - T_0/T_C|$. Le graphique ci-dessous illustre la variation d'exergie pour un système à 293°K, soit 20°C.

⁹ www.wikipédia.com



Ainsi, l'apport exergetique d'un transfert de chaleur est toujours inférieur à la quantité de chaleur reçue. En effet, le facteur de Carnot est toujours inférieur ou égal à 1. De plus, l'apport est d'autant plus grand que la température est de la source chaude (extérieure au système) est élevée (pente positive dans la partie droite du graphique). Un apport de chaleur d'une source à température plus faible que le système représente une consommation d'exergie, d'autant plus grande que la température de la source est faible (pente négative dans la partie gauche du graphique).

Études de cas

Cycle énergétique

Voici un exemple pour bien comprendre la transformation de l'énergie. Le Soleil : les atomes d'hydrogène qu'il contient se fusionnent sous la chaleur intense due à l'intense champ gravitationnel; en se fusionnant le tout perd de la masse par rapport aux parties et ce déficit est transformé en rayonnements électromagnétiques ($E = mc^2$). Ces rayonnements possèdent une énergie qui traverse l'espace et atteint la surface de la Terre. Cette énergie électromagnétique peut alors, par exemple, être utilisée par les plantes qui la transforment en énergie chimique en décomposant l'acide carbonique de l'air; par les cellules photovoltaïques des panneaux solaires qui la convertissent en courant électrique; par les combustibles fossiles tels le pétrole qui, lors de la combustion, produisent des déchets, tels le dioxyde de carbone, et de la chaleur. Alors, dans le cas d'un moteur à combustion d'une automobile, cette énergie (bio)chimique, provoquant le mouvement des pistons et le déplacement de la voiture, est transformée en énergie cinétique; lors du freinage, cette énergie cinétique est transformée en énergie thermique (chaleur). Mais l'action des multiples engrenages produisent également de la chaleur, par friction, laquelle ne peut être récupérée pour effectuer un travail utile.

Maison individuelle

À compléter

Conclusion

Ainsi, l'énergie se conserve et se transforme. Toutefois, il n'est pas toujours possible d'en tirer un travail utile et cette possibilité diminue sans cesse. C'est ce que considère l'exergie. Dans le cas d'exergie thermique, le plus éloquent, la quantité d'énergie contenue dans le système ne garantit pas qu'on puisse en tirer quelque chose. En effet, cette énergie – comme potentiel de travail – doit pouvoir compter sur une différence de température pour espérer effectuer un travail utile; et cela est déterminé par le coefficient de Carnot.

À compléter

Bibliographie

1. BERTHIAUME, Richard, *L'énergétique*, formation continu, Université Laval, 2006.
2. BRUNHES, Bernard, *La dégradation de l'énergie*, Champs-Flammarion, 1909.
3. VAN WYLEN, SONNTAG, DESROCHERS, *Thermodynamique appliquée*, ERPI, 1992.
4. <http://fr.wikipedia.org>