



idées

Innovation, Développement durable
énergie, environnement et société

**Réduction de la
consommation d'énergie**
« Approche thermodynamique »

Alexandre ROJEY



Décembre 2009

Les opinions émises dans ce texte sont propres à leurs auteurs et ne reflètent pas nécessairement le point de vue de la Fondation Tuck, de ces fondateurs ou mécènes.

Pour toute information sur le contenu, prière de contacter l'auteur
alexandre.rojey@gmail.com

Pour toute information complémentaire, prière de contacter la Fondation Tuck
contact@fondation-tuck.fr

Table des matières

1. Réduction de la consommation d'énergie.....	3
2. Génération d'entropie.....	3
3. Fonctionnement d'un système en équilibre dynamique.....	5
4. Analyse exergétique.....	8
5. Minimisation des irréversibilités – Progrès prospectifs.....	8
6. Conclusion.....	11
Références.....	11
Annexe 1.....	12
Annexe 2.....	16

L'auteur remercie Francis Meunier, Professeur au CNAM et membre du Conseil Scientifique de la Fondation Tuck, pour sa relecture attentive et ses suggestions

1. Réduction de la consommation d'énergie

La première des priorités pour assurer dans de meilleures conditions la transition énergétique, est de réduire la consommation d'énergie. Réduire cette consommation contribue à diminuer la dépendance vis à vis des approvisionnements énergétiques et à éliminer les émissions correspondantes de CO₂, ainsi que tout autre impact environnemental lié à la production d'énergie [1].

Les actions à mener sont de trois natures différentes :

- Comportement plus sobre, les consommateurs acceptant de réduire leur demande en énergie, notamment en éliminant les gaspillages. Un tel comportement peut être le résultat d'un prix de l'énergie élevé ou d'une volonté de contribuer à une préservation de l'environnement sur la base d'une éthique personnelle.

- Aménagements et infrastructures : mise en place de transports collectifs, augmentation de la densité de l'habitat, etc.

- Amélioration de l'efficacité énergétique.

L'amélioration de l'efficacité énergétique résulte avant tout de progrès techniques. La question de l'amélioration de l'efficacité énergétique est en général analysée sous l'angle du seul bilan énergétique et du premier principe de la thermodynamique. Pourtant le second principe de la thermodynamique joue un rôle essentiel.

En effet, d'après le premier principe l'énergie se conserve et n'est donc pas vraiment « consommée ». Pour fonctionner, un système dynamique réel prélève de l'énergie de « haute qualité », qu'il rejette ensuite sous forme de chaleur à bas niveau. L'énergie est ainsi dégradée et cette transformation est, d'après le second principe, irréversible. Pour optimiser l'utilisation de l'énergie, il est donc nécessaire d'étudier la génération d'**entropie** et la façon de minimiser les irréversibilités se produisant dans le système.

2. Génération d'entropie

Lorsque l'énergie est utilisée, sa qualité se dégrade et elle finit par être rejetée sous forme de chaleur à la température ambiante et ne peut plus être réutilisée. L'énergie est consommée sous une forme à basse entropie et rejetée sous une forme à haute entropie. Le second principe de la thermodynamique spécifie que l'entropie d'un système isolé ne peut que croître. L'entropie d'un système mesure son niveau de désordre et la croissance de l'entropie signifie que le désordre à l'intérieur d'un système isolé ne peut qu'augmenter.

La loi de génération d'entropie ne s'applique pas uniquement aux processus de transformation de l'énergie, mais aussi à l'utilisation des ressources matérielles. Celles-ci sont assimilées dans un état à basse entropie et rejetées sous forme de déchet dans l'environnement, dans un état à plus haute entropie. Un déchet rejeté dans le milieu ambiant, que ce soit de l'air ou de l'eau se mélange de manière irréversible dans ce milieu ambiant. Pour le séparer et le recycler, il faut alors dépenser d'autant plus d'énergie qu'il est dilué dans le milieu ambiant et si sa teneur est faible, l'énergie correspondante devient élevée. La loi de génération d'entropie peut être appliquée à un système ouvert quelconque et en particulier au système englobant l'ensemble des activités humaines, selon le schéma de la figure 1.

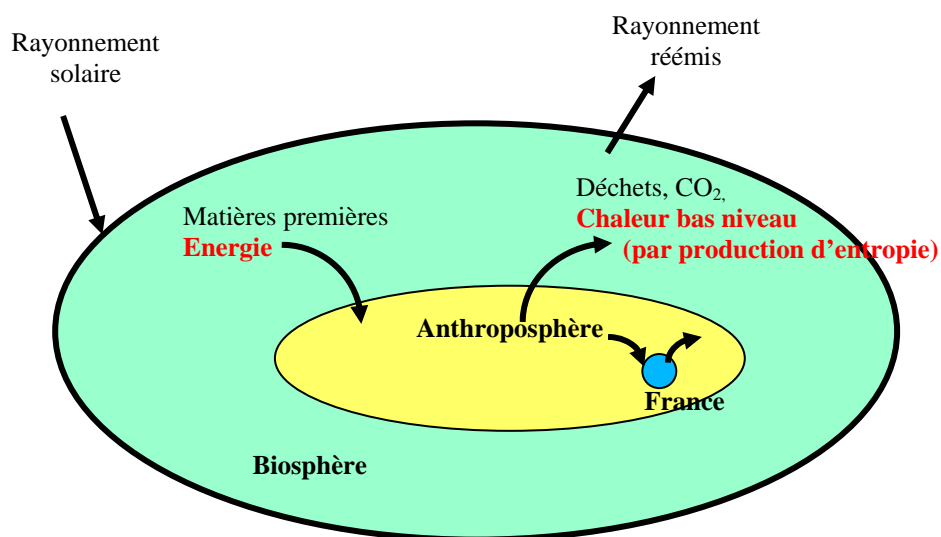


Figure 1- Génération d'entropie

La biosphère est formée par l'ensemble des plantes et des organismes vivants qui peuplent la terre. L'ensemble des activités humaines constitue un sous-système désigné par le terme d'«anthroposphère». Globalement, ce sous-système prélève des ressources (matières premières, énergies fossiles) sur le milieu environnant et rejette des déchets ainsi que du CO₂. L'énergie est consommée sous forme d'énergie de haute qualité (fossile, nucléaire, renouvelable) et rejetée sous forme de chaleur à bas niveau.

Ainsi, «dans le contexte de l'entropie, chaque action de l'homme ou d'un organisme, voire tout processus dans la nature ne peut aboutir qu'à un déficit pour le système total». La loi de l'entropie est donc à l'origine de la rareté économique. C'est elle qui empêche de réutiliser les ressources naturelles qui ont été consommées. En effet l'entropie d'un système isolé ne peut que croître.

N. Georgescu-Roegen a été le premier à concevoir la portée très générale de la génération d'entropie et à introduire ce concept dans le champ de l'économie. Il a montré que toute activité humaine produit des changements irréversibles dans la nature, en générant de l'entropie, c'est-à-dire plus de désordre dans l'univers. La génération d'entropie est liée d'une part à la consommation d'énergie et d'autre part au rejet de déchets dans l'environnement [2].

Partant de ce constat et de l'idée que toute activité humaine génère plus de désordre dans l'univers, les partisans de la «décroissance» considèrent que dans ces conditions le seul remède possible consiste à réduire les niveaux de production et de consommation, en priorité bien sûr dans les pays les plus développés et les plus riches [3], [4]. N. Georgescu Roegen lui-même peut être considéré comme le précurseur des théories de la décroissance.

Les systèmes vivants arrivent pourtant à maintenir un «**équilibre dynamique**» avec l'écosystème environnant et il est même possible de concevoir des systèmes qui, tout en étant en équilibre dynamique, comme la biosphère dans son ensemble, n'échangent aucun flux de matière avec l'extérieur, et dont l'impact sur l'environnement est donc nul.

3. Fonctionnement d'un système en équilibre dynamique

La terre n'est pas isolée et reçoit de l'énergie du soleil. La biosphère est en équilibre dynamique grâce à cet apport d'énergie solaire. L'énergie est utilisée par la biosphère et ensuite réémise dans l'espace sous forme de rayonnement infrarouge. Ce rayonnement représente une forme d'énergie dégradée correspondant à un bas niveau thermique. Cette émission de chaleur à bas niveau permet de maintenir constant le niveau d'entropie.

Il est ainsi possible de concevoir un système en équilibre dynamique entièrement fermé en ce qui concerne les échanges de flux de matière avec l'extérieur. Un apport d'énergie reste indispensable pour compenser la génération d'entropie à l'intérieur du système (ce n'est donc pas un système isolé). Si cet apport d'énergie s'effectue sous forme d'énergie solaire, l'environnement reste entièrement préservé. Un tel système constitue une **écosphère**.



Figure 2- Une écosphère¹

Une écosphère est, comme la biosphère, un système auto-entretenu, grâce à un apport d'énergie solaire. Cet apport d'énergie permet de compenser la production d'entropie liée à la présence d'organismes vivants et ainsi de permettre le maintien d'un équilibre dynamique. Prigogine a montré qu'un apport d'énergie permet de maintenir un système ordonné loin de l'équilibre. Des systèmes maintenus ainsi loin de l'équilibre, tout en générant de l'entropie sont qualifiés de **systèmes dissipatifs** [5].

Une écosphère est constituée par un système écologique fermé en ce qui concerne les échanges de matière. Elle peut être de petite dimension et incorporée dans une simple boule en verre (figure 2). Son fonctionnement dépend d'un apport d'énergie solaire et elle doit contenir un organisme capable de mettre en œuvre un mécanisme de photosynthèse, qui est le plus souvent constitué par une algue verte. Des organismes vivants tels que la crevette d'Hawaï *Halocarudina* ainsi que des algues spirulines peuvent être introduits dans l'écosphère. Toutefois, en pratique, les écosphères sont trop petites pour assurer de bonnes conditions de survie des crevettes *Halocarudina* et le fonctionnement d'un tel système biologique ne peut pas être assuré indéfiniment, mais tout au mieux quelques années.

¹ Source : Wikipedia ; système écologique fermé

Dans un tel système, un fonctionnement continu est maintenu, hors équilibre thermodynamique, grâce à un apport d'énergie extérieure sous forme de rayonnement. L'énergie est ensuite renvoyée sous forme de chaleur à une température proche de l'ambiante, par conduction et rayonnement. Ceci signifie que de l'énergie arrive à un niveau d'entropie relativement bas, en étant ensuite évacuée à un niveau relativement haut. Le système reçoit ainsi de la «négentropie», qui compense la production d'entropie liée aux irréversibilités qui sont générées par le métabolisme du système biologique qui se situe à l'intérieur de l'écosphère. Dans le cas d'une écosphère contenant des crevettes *Halocarudina*, l'apport d'énergie par rayonnement doit rester modéré, ce qui montre qu'un fonctionnement continu ne peut être assuré que dans un domaine relativement restreint.

A une échelle plus importante, des expérimentations ont été menées pour réaliser des systèmes fermés dans lesquels puissent subsister des animaux évolués ainsi que des êtres humains. Le plus grand des systèmes ainsi réalisés est «Biosphere 2». Cette désignation fait référence au fait que la terre est considérée comme la «Biosphere 1». L'installation se présente comme une immense serre de 1,27 ha, qui fut construite entre 1987 et 1991 dans le désert de l'Arizona. Deux missions ont été réalisées : la première de deux ans regroupait huit scientifiques, médecins et chercheurs, la deuxième s'arrêta prématurément et ne dura que six mois. Ces expérimentations n'ont pas été entièrement concluantes. Elles ont montré la difficulté, voire l'impossibilité d'un fonctionnement en autarcie complète. En outre, des difficultés financières ont compromis la possibilité d'une recherche purement scientifique et ont amené des controverses quant aux méthodes utilisées. Le site a dû être vendu, l'Université de l'Arizona ayant néanmoins exprimé sa volonté de l'utiliser pour un usage scientifique et éducatif [6].

Pour que l'ensemble des activités humaines puisse fonctionner avec un impact minimal sur l'environnement, il faut que son fonctionnement se rapproche de celui d'un système écologique fermé, tel qu'une écosphère. Dans le fonctionnement actuel, les activités humaines prélèvent des ressources sur l'environnement extérieur et rejettent des déchets. Pour aller vers un «équilibre dynamique», il faut prélever sur l'environnement extérieur le moins possible de ressources non renouvelables, tout en assurant un apport permanent d'énergie. Le système peut alors fonctionner de manière «durable», sans prélever de ressources non renouvelables sur l'extérieur, l'entropie générée par les activités humaines étant compensée par la négentropie résultant d'un apport d'énergie à bas niveau d'entropie, qui est ensuite dissipée à un haut niveau d'entropie.

L'analyse des moyens à mettre en œuvre pour permettre à un tel système de fonctionner en symbiose fait l'objet des démarches d'écologie industrielle [7], pour des systèmes spécifiques, mais peut être étendue à l'ensemble des activités humaines («anthroposphère»).

En pratique, un tel schéma correspond à un cas limite, dont on ne peut que se rapprocher, sa réalisation effective se heurtant pour le moment à des obstacles économiques évidents.

Ceci montre néanmoins qu'il est au moins en principe possible d'aller vers un système zéro-déchet et donc zéro-consommation de matières premières épuisables. Un apport d'énergie reste indispensable et que du fait de la génération d'entropie, il n'est pas possible d'aller vers un recyclage complet de l'énergie. La recherche de sources d'énergie durable demeure donc essentielle.

L'approche thermodynamique peut néanmoins servir à préciser les conditions à remplir pour minimiser la consommation d'énergie.

4. Analyse exergetique

Le fonctionnement d'un système en régime permanent peut être analysé par un bilan exergetique, qui combine bilan d'énergie et bilan d'entropie.

L'**exergie** représente la fraction maximale de l'énergie qui est récupérable sous forme de travail en présence d'un milieu ambiant à une pression de référence p_0 (pression atmosphérique = $1,013 \cdot 10^5$ Pa) et une température de référence T_0 , dont la valeur est fixée par convention à 298,15 K, soit 25°C. Le concept d'exergie a été introduit par Zoran Rant en 1956 [8].

Lorsqu'une certaine quantité d'énergie est utilisée, l'exergie représente la fraction qui est utilisée effectivement (c'est à dire transformée en travail) et l'anergie, celle qui est perdue sous forme de chaleur rejetée dans le milieu ambiant. Au cours d'une transformation quelconque, une partie de l'exergie est nécessairement perdue en raison des irréversibilités intervenant dans le système et le rendement exergetique défini comme l'exergie disponible à l'issue de la transformation, rapporté à l'exergie disponible avant transformation (exergie entrante) est inférieur à 1. Le rendement exergetique ne devient égal à 1 que dans le cas d'un système réversible idéal.

Une bibliographie des principales références sur le sujet a été établie par James J. Kay [9]. L'expression du bilan exergetique dans le cas le plus général d'un système pouvant comprendre des réactions chimiques et/ou physico-chimiques quelconques est présentée en Annexe 1, sur la base d'une publication antérieure [9]. Le cas où de telles transformations interviennent dans le système conduit fréquemment à des choix délicats d'état de référence. Le choix qui a été fait dans la formulation présentée en Annexe 1 est de définir l'exergie associée à une quantité de matière entrante ou sortante comme le travail maximal récupérable, à composition constante du flux de matière. On définit par ailleurs une exergie de réaction ou de séparation (mélange) par le travail maximal récupérable pour des flux de matière entrant et sortant dans les conditions de référence p_0 et T_0 .

Les irréversibilités thermodynamiques susceptibles d'intervenir sont principalement de trois types :

- Irréversibilités mécaniques, dues au frottement (surfaces solides ou comportement visqueux des fluides).
- Irréversibilités thermiques dues à des chutes de température au cours d'un processus de transfert de chaleur ou de mélange entre des fluides de température différente.
- Irréversibilités au cours d'un processus de mélange entre fluides de composition différente.

Si l'on considère le fonctionnement d'une écosphère, les irréversibilités qui résultent du métabolisme des organismes placés dans l'écosphère génèrent de l'entropie et par conséquent le système consomme de l'exergie. Cette consommation d'exergie est compensée par l'exergie fournie sous forme de rayonnement. A la différence de l'énergie, l'exergie ne se conserve que dans le cas d'un système réversible idéal. Dans tout système réel, les irréversibilités thermodynamiques entraînent une perte d'exergie. En régime permanent, le système ne consomme pas d'énergie. L'énergie réémise par l'écosphère est égale à l'énergie transmise par rayonnement, mais le système consomme nécessairement de l'exergie, qui lui est fournie par le rayonnement. Le bilan exergetique est présenté de façon plus détaillée en Annexe 2.

Si l'on considère l'ensemble des activités humaines, il est possible de se rapprocher d'un recyclage total des matières premières consommées, mais il est impossible d'annuler la consommation d'énergie. Il demeure indispensable de pouvoir assurer une fourniture durable d'énergie pour pouvoir maintenir un fonctionnement continu en régime permanent du système hors de l'équilibre thermodynamique.

Une réduction de la consommation d'énergie (ainsi que de l'exergie initialement disponible) dans un système industriel, résidentiel ou tertiaire à toute échelle peut être obtenue en minimisant l'ensemble des irréversibilités.

Une telle démarche est déjà pratiquée, notamment dans toutes les études de procédés industriels. Elle consiste à minimiser les écarts de températures au cours de tous les échanges thermiques, à éviter les mélanges de fluides de température ou de composition différente, à réduire les irréversibilités mécaniques, par exemple en remplaçant une vanne de détente par une turbine récupérant une partie de l'énergie mécanique (*expander*).

Cette analyse est utilisée également pour définir des séquences optimales d'opérations unitaires (réactions, séparations) ainsi que d'échangeurs de chaleur [10]. Elle permet d'optimiser l'intégration matière et énergie de tout système, notamment en agençant les unités selon le principe de la «cascade thermique», les rejets thermiques des unités opérant aux températures les plus élevées alimentant en chaleur des unités opérant à des températures plus basses.

Toutes ces actions qui concourent à améliorer les performances énergétiques du système étudié ne découlent pas de la simple analyse du bilan énergétique.

5. Minimisation des irréversibilités - Progrès prospectifs

L'analyse exergétique débouche également sur la conception de systèmes innovants, qui pourront se développer à l'avenir dans un contexte d'énergie plus chère :

- Thermoamplificateurs et thermotransformateurs

Une utilisation optimale de l'énergie implique de minimiser les irréversibilités. Ceci peut être illustré en examinant le cas très simple d'un échange de la quantité de chaleur Q entre une source à la température T_1 et une source à une température plus basse T_2 .

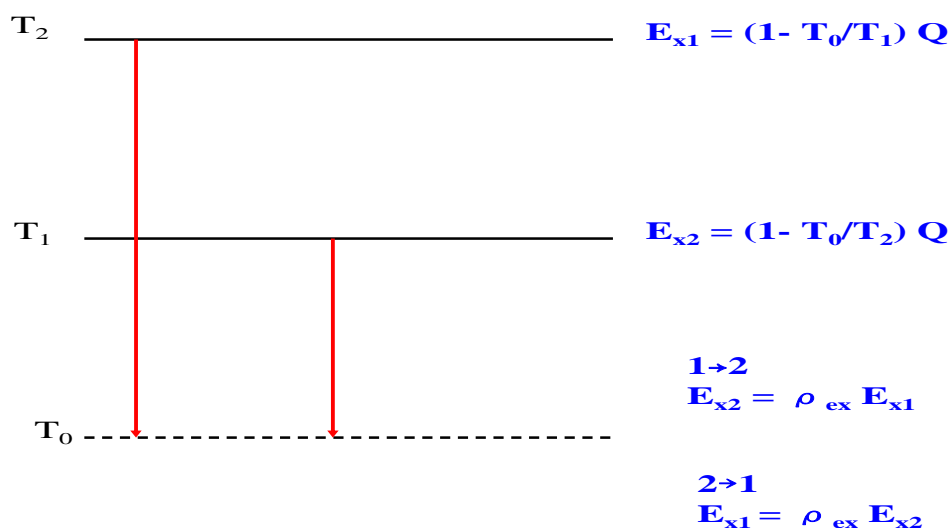


Figure 3- Echange de chaleur à température différente

Le transfert de chaleur d'une source de chaleur à une température très élevée (telle que l'exergie est voisine de la quantité de chaleur disponible) à une température beaucoup plus basse se traduit par une perte très importante d'exergie. Ainsi si la source 2 est à 60°C (333.15 K), le rendement exergétique est d'environ 10%.

Dans un tel cas en utilisant un cycle tritherme et en puisant de la chaleur sur le milieu ambiant (pompe à chaleur), il est possible, au moins en principe de fournir à la température T_2 une quantité de chaleur qui peut être beaucoup plus importante que la quantité de chaleur initiale disponible à la température T_1 .

De tels **thermoamplificateurs** ont été effectivement réalisés, soit en utilisant des équipements mécaniques, soit un processus physico-chimique (pompe à chaleur à absorption, opérant avec les couples eau-ammoniac et eau-bromure de lithium). Dans le cas des équipements qui ont été effectivement réalisés les performances sont limitées (COP voisin de 2), du fait que la température maximale (générateur) est actuellement limitée à 200°C. Il existe dans ce domaine un potentiel de progrès important. Dans un contexte de prix de l'énergie relativement bas, ces systèmes n'ont pas connu récemment de développements importants, mais pourraient susciter à nouveau un vif intérêt si le prix de l'énergie remonte.

Le bilan exergétique montre également qu'à partir d'une quantité de chaleur disponible à une température relativement basse T_2 , il est possible au moyen d'un cycle tritherme de produire de la chaleur à plus haute température T_1 , mais avec un rendement qui ne peut être bien entendu qu'être inférieur à 1.

Un tel **thermotransformateur** peut être réalisé soit au moyen d'équipements mécaniques soit d'un cycle à absorption.

- Cogénération

Une autre façon d'exploiter un écart de température lors d'un processus de transmission de chaleur consiste à mettre en œuvre un dispositif de **cogénération**, en utilisant un cycle moteur opérant entre les températures T_1 et T_2 . Les systèmes à vapeur d'eau et turbine à contre-pression ou à turbine à gaz sont d'un usage courant.

Dans l'avenir, des systèmes de cogénération mettant en œuvre des piles à combustible à haute température (SOFC) devraient se développer. Il existe dès à présent de nombreuses offres commerciales [12]. Une option intéressante consiste à coupler une telle pile à combustible avec une pompe à chaleur à absorption [13].

- Effet Peltier et effet Seebeck

Le schéma de principe d'un module à effet Peltier est représenté sur la figure 4. Il associe en parallèle des éléments semi-conducteurs de type p et de type n. La création de trous dans les éléments de type p se produit avec absorption de chaleur et le transfert d'électrons dans les éléments de type n s'effectue avec production de chaleur. Les éléments p et n sont placés entre deux plaques conductrices dont l'une capte la chaleur et l'autre restitue la chaleur.

Schematic of a Thermoelectric Cooler

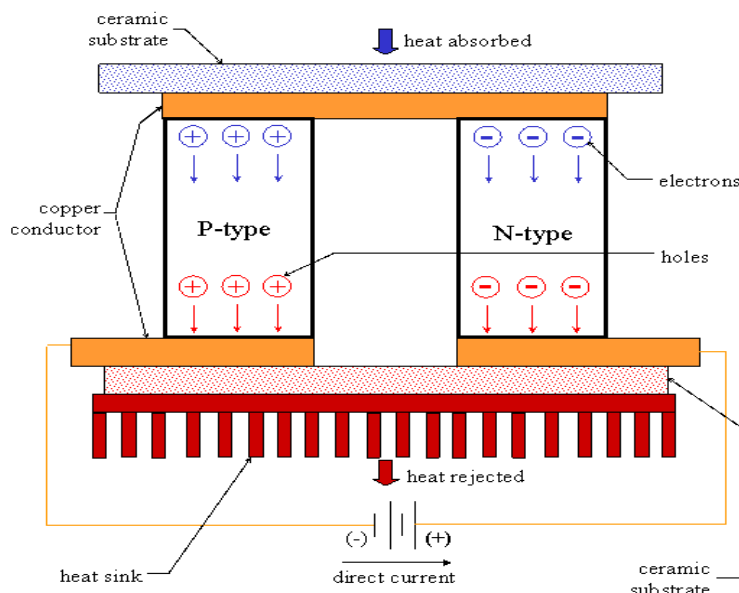


Figure 4- Schéma de principe d'un module à effet Peltier
(TE Technology, FAQ & Technical Information, www.tetech.com)

L'effet Seebeck est l'effet inverse, la différence de potentiel électrique apparaissant lorsque l'une des plaques est chauffée et l'autre refroidie.

Les applications commerciales des dispositifs thermoélectriques sont pour le moment limitées, compte tenu des coûts relativement élevés et de rendements assez faibles. Ces dispositifs qui sont entièrement statiques présentent des avantages évidents en termes de fiabilité et de durée de vie. Des progrès futurs pourraient ouvrir de très larges débouchés, notamment dans l'habitat. Il serait ainsi possible de réaliser une paroi chauffante ou rafraîchissante selon les besoins.

- Minimisation des irréversibilités mécaniques - supralubrification

La réduction des irréversibilités mécaniques concerne toutes les pièces mécaniques en frottement. Le frottement mécanique, responsable de l'usure et de perte d'énergie, est un enjeu stratégique important. Le coût de ces frottements est estimé représenter en France 3% du PIB, soit 25 milliards d'euros et aux USA, 6% du PIB, environ 794 milliards de dollars. Un quart de l'énergie disponible est perdu dans le moteur à explosion par le seul frottement des pièces mécaniques.

Les recherches en cours montrent la possibilité de réduire ces frottements à des valeurs très faibles. Hirano (Université Gifu au Japon) a introduit en 1991 le terme de supralubrification pour caractériser de tels systèmes tribologiques. Il a montré la possibilité de quasi-disparition du frottement lorsqu'il y a glissement entre surfaces cristallines constituées de réseaux incommensurables. Des effets similaires ont également été observés dans le cas de couches minces de carbone amorphe hydrogéné (a-C:H) aussi appelé Diamond-Like Carbon (DLC) et en utilisant un revêtement carbone tétraédrique (ca-T) en présence de glycérol [14].

De nouvelles percées dans ce domaine ouvriraient des perspectives considérables. Les traitements de surface ne requièrent que très peu de matériau actif et il serait envisageable de diffuser largement des revêtements réduisant d'un ordre de grandeur les pertes par frottement.

6. Conclusion

La prise en compte de la génération d'entropie et l'analyse exergetique s'avèrent des outils indispensables pour élaborer un plan d'action visant à réduire la consommation, en améliorant l'efficacité énergétique.

La démarche présentée peut être appliquée à des échelles très différentes :

- Elle permet de mieux comprendre les conditions à respecter pour assurer un équilibre dynamique global.
- Elle sert de guide dans l'optimisation de l'ensemble des échanges intervenant dans un système et constitue de ce fait un des outils de l'écologie industrielle.
- Elle aide à la conception d'un équipement spécifique.
- Elle fournit de nouvelles voies de recherche.

Le choix des mesures effectivement appliquées dépendra bien entendu des facteurs économiques, mais, comme dans le domaine des énergies renouvelables, des réductions de coût importantes sont possibles dans l'avenir si un nouveau marché se constitue.

Références

- [1] Alexandre Rojey, « Energie et climat – Réussir la transition énergétique », Editions Technip, 2008
- [2] Nicholas Georgescu-Roegen, « La décroissance- Entropie, écologie, économie », 1979, Les Editions Sang de la terre, 2^{ème} édition, 1995
- [3] Yves Cochet, « Antimanuel d'écologie », Editions Bréal, 2009
- [4] Jean-Paul Fitoussi, Eloi Laurent, « La nouvelle écologie politique- Economie et développement humain », Seuil, 2008
- [5] Ilya Prigogine, Dilip K. Kondeputi, « Thermodynamique : des moteurs aux structures dissipatives », Odile Jacob, 1999
- [6] <http://www.b2science.org/>
- [7] Suren Erkman, « Vers une écologie industrielle », Editions-Diffusion Charles Leopold Mayer, 2004
- [8] Rant, Zoran. "Exergie, ein neues Wort für Technische Arbeitsfähigkeit", Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens, 22: pp.36–37, 1956
- [9] <http://web.archive.org/web/20050210183514/http://www.fes.uwaterloo.ca/u/jjkay/pubs/exergy/biblio.html>
- [10] Alexandre Rojey, « Optimisation énergétique des procédés de séparation », Revue de l'IFP, Vol.49, n° 6, pp. 627-638, 1994
- [11] Victor Kaiser, « Industrial Energy Management – Refining Petrochemicals and Gas Processing Techniques », Editions Technip, 1993
- [12] http://www.fuelcellmarkets.com/fuel_cell_markets/combined_heat_and_power_cogeneration_chp/4,1,1,2184.html
- [13] http://www.eere.energy.gov/de/pdfs/absorption_future.pdf
- [14] <http://ltds.ec-lyon.fr/activites/pdf/OS1.pdf>

Annexe 1

Considérons le système ouvert très général opérant en régime permanent représenté sur la figure A1.

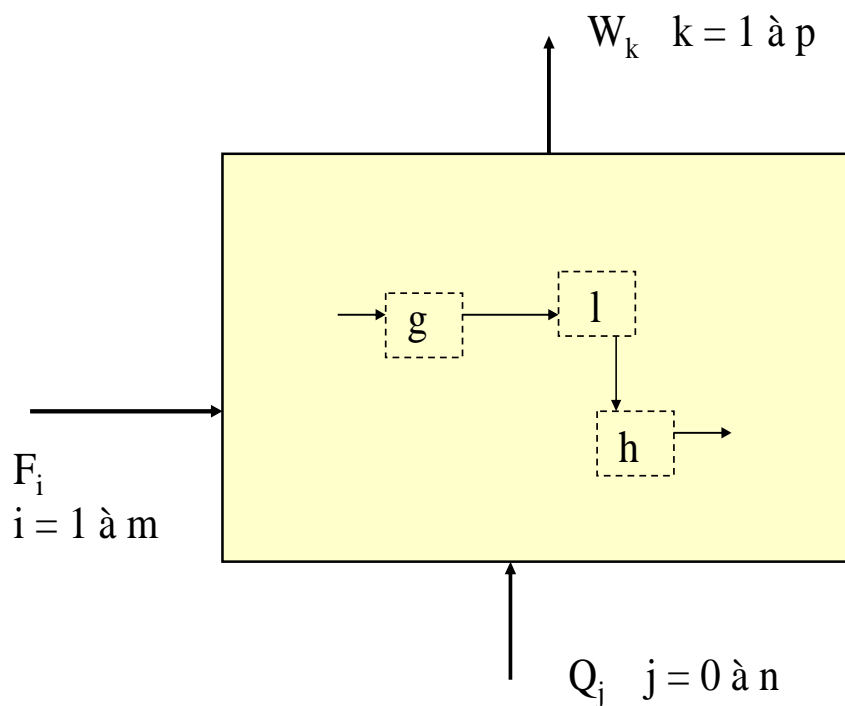


Figure A1- Système ouvert opérant en régime permanent

Ce système échange par unité de temps avec l'extérieur :

- m quantités de matière F_i
- $n+1$ quantités de chaleur Q_j à la température T_j , l'indice 0 étant réservé aux échanges avec le milieu ambiant de référence à la pression p_0 (pression atmosphérique = 1,013.105 Pa) et à la température T_0 (par convention 25°C, soit 298,15 K)
- p quantités d'énergie mécanique W_k

Chacun des termes F_i , Q_j et W_k est considéré comme positif s'il est reçu par le système, négatif s'il est cédé par le système.

Enfin le système possède r sous-systèmes dans lesquels sont opérées r transformations physiques ou chimiques (schématisées sur la figure 1 par les cases g, l et h)

Pour ce système, les équations de bilan s'écrivent sous la forme des relations (1) à (3) :

- Bilan matière

$$\sum_{i=1}^m F_i = 0 \quad (1)$$

- Bilan enthalpique

$$\sum_{i=1}^m H_i + \sum_{j=1}^n Q_j + \sum_{k=1}^p W_k = 0 \quad (2)$$

- Bilan entropique

$$\sum_{i=1}^m S_i + \sum_{j=0}^n \frac{Q_j}{T_j} + \pi = 0 \quad (3)$$

Les termes H_i et S_i représentent respectivement l'enthalpie et l'entropie de la quantité de matière F_i . Les termes F_i , H_i , S_i sont comptés positivement dans le cas d'un flux de matière entrant et négativement dans le cas d'un flux de matière sortant. Les termes Q_j représentent les quantités de chaleur échangées par unité de temps. Ils sont comptés positivement dans le cas d'une quantité de chaleur reçue par le système, négativement dans le cas d'une quantité de chaleur cédée par le système. Le terme π représente la quantité d'entropie générée dans le système par unité de temps, en raison de toutes les irréversibilités. Selon le second principe, le terme π est nécessairement positif. Il ne devient nul que dans le cas limite d'un système réversible idéal. Par combinaison des relations (2) et (3), on obtient la relation de bilan exergétique (4) :

$$\sum_{i=1}^m [(H_i - H_i^*) - T_0 (S_i - S_i^*)] + \sum_{j=1}^m (H_j^* - T_0 S_j^*) + \sum_{j=1}^n Q_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) + \sum_{k=1}^p W_k - T_0 \pi = 0 \quad (4)$$

Les termes H_i^* et S_i^* désignent respectivement l'enthalpie et l'entropie de la quantité de matière F_i aux conditions de référence T_0 et p_0

Le système comprend r sous-systèmes dans lesquels sont opérées des transformations physiques ou chimiques (séparations, mélanges ou réactions chimiques modifiant les compositions des flux de matière)

Désignons par H_{gl}^* l'enthalpie reçue par le sous-système l du sous système g , le terme H_{0l}^* désignant l'enthalpie échangée avec l'extérieur.

$$\sum_{i=1}^m H_i^* = \sum_{l=1}^r H_{0l}^* = \sum_{l=1}^r \sum_{g=0}^r H_{gl}^* = 0 \quad (5)$$

En raison de la convention de signe, $H_{gl}^* = -H_{lg}^*$ et par conséquent:

$$\sum_{l=1}^r \sum_{k=1}^r H_{gl}^* = 0 \quad (6)$$

On en déduit la relation:

$$\sum_{i=1}^m H_i^* = - \sum_{l=1}^r \Delta H_l^* \quad (7)$$

et de la même façon:

$$\sum_{i=1}^m S_i^* = - \sum_{l=1}^r \Delta S_l^* \quad (8)$$

Le bilan d'exergie s'écrit en définitive sous la forme:

$$\sum_{i=1}^m [(H_i - H_i^*) - T_0 [(S_i - S_i^*)] + \sum_{l=1}^r - (\Delta H_l^* - T_0 \Delta S_l^*) + \sum_{j=1}^n Q_j (1 - \frac{T_0}{T_j}) + \sum_{k=1}^p W_k - T_0 \pi = 0 \quad (9)$$

On associe ainsi un terme d'exergie :

- A un échange de quantité de matière F_i :

$$(H_i - H_i^*) - T_0 (S_i - S_i^*)$$

- A un échange de quantité de chaleur Q_j :

$$Q_j (1 - T_0/T_j)$$

- A un échange de travail W_k :

$$W_k$$

- A une réaction chimique ou une transformation physico-chimique r opérée dans le système :

- $(\Delta H_l^* - T_0 \Delta S_l^*)$

La relation (9) s'écrit encore:

$$\sum_i E_{xi} - T_0 \pi = 0 \quad (10)$$

Les termes E_{xi} désignant tous les échanges d'exergie précédents l'exergie étant considérée comme entrante (reçue par le système) si le terme est positif, sortante (cédée par le système) s'il est négatif. En désignant par E_{xe} la somme de tous les termes positifs (exergie entrante) et par E_{xs} la somme de tous les termes négatifs (exergie sortante), on obtient:

$$E_{xe} = |E_{xs}| + T_0 \pi \quad (11)$$

En vertu du second principe, la production d'entropie π est positive et $|E_{xs}| < E_{xe}$. Le rendement exergetique est défini par la relation:

$$\eta_{ex} = \frac{|E_{xs}|}{E_{xe}} \quad (12)$$

Le rendement exergetique η_{ex} est nécessairement compris entre 0 et 1. Il devient égal à 1 pour un système idéal dans lequel la production d'entropie est nulle.

Annexe 2

Bilan exergétique d'une écosphère

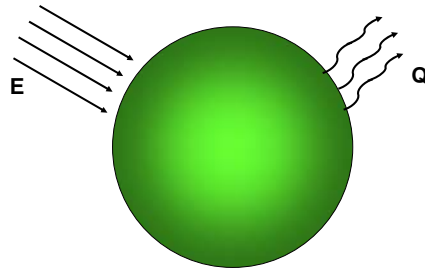


Figure A2- Ecosphère : échanges d'énergie avec le milieu ambiant

L'écosphère forme un système fermé, qui n'échange d'énergie qu'avec l'extérieur. On fait l'hypothèse que le système opère en régime permanent (ce qui n'est qu'une hypothèse approchée dans la mesure où le système finit par dépérir au bout d'un certain nombre d'années).

Par unité de temps, l'écosphère reçoit une quantité d'énergie E sous forme de rayonnement solaire. La température du soleil étant très élevée (environ 5800 K en surface), la quantité d'exergie E_x correspondante est très proche de la quantité d'énergie reçue (environ 95%). Le système opérant en régime permanent, la quantité d'énergie cédée par le système sous forme de chaleur Q est égale à la quantité d'énergie fournie par le rayonnement solaire.

La chaleur Q est émise au niveau du sol, à une température T_s très proche de la température de référence $T_0 = 298,15\text{K}$ utilisée pour la définition de l'exergie. Le terme d'exergie correspondant $Q(1 - T_0/T_s)$ est de la forme $Q \cdot \xi$. En négligeant ce terme, on obtient par unité de temps la relation de bilan exergétique :

$$E_x = T_0 S$$

S correspondant à la production d'entropie par unité de temps dans le système due aux différentes irréversibilités thermodynamiques se produisant dans l'écosphère, notamment en raison des transferts thermiques (ce premier terme d'entropie qui est le plus important, est à prendre en compte même dans le cas d'une sphère inerte remplie d'eau) ainsi qu'au métabolisme des organismes placés dans l'écosphère, qui fait intervenir des cycles de transformation, opérant sans apport net de matière ou d'énergie, mais générant de l'entropie.



Recherche et formation pour un développement durable dans le domaine de l'énergie

Fondation Tuck

1 et 4, avenue de Bois-Préau - 92852 Rueil-
Malmaison Cedex Tél. : 01 47 52 71 13 –
Fax : 01 47 52 70 39 contact@fondation-tuck.fr