

1996

Termes de Signes Positif et Négatif en Analyses Exergétiques des Flux de Chaleur

Jim McGovern

Technological University Dublin, jim.mcgovern@tudublin.ie

Pierre Le Goff

CNRS-ENSIC-ESVE, Nancy, France

Follow this and additional works at: <https://arrow.tudublin.ie/engmecdesignart>



Part of the [Energy Systems Commons](#)

Recommended Citation

McGovern, James and Pierre Le Goff. (1996) Termes de signes positif et négatif en analyses exergétiques des flux de chaleur. *Revue Générale de Thermique* 35(418) (1996), 651-655. doi:10.1016/S0035-3159(96)80061-4

This Article is brought to you for free and open access by the School of Mechanical and Design Engineering (Former DIT) at ARROW@TU Dublin. It has been accepted for inclusion in Articles by an authorized administrator of ARROW@TU Dublin. For more information, please contact arrow.admin@tudublin.ie, aisling.coyne@tudublin.ie, vera.kilshaw@tudublin.ie.

LES TERMES DE SIGNE POSITIF ET NEGATIF EN ANALYSES EXERGETIQUES DES FLUX DE CHALEUR

J. MC GOVERN

Dept. of Mechanical and Manufacturing Engineering
Trinity College
Dublin 2, IRELAND

P. LE GOFF

Laboratoire des Sciences du Génie Chimique
CNRS - ENSIC - ESVE
1 rue Grandville (CEGEP)
BP 451, 54001 NANCY

ABSTRACT

In various technical plants there are heat transfer rates at temperatures above that of the environment and other simultaneous heat transfer rates at temperatures below the temperature of the environment. This is the case in cryogenic industrial processes where a cooling effect is produced from a heat source. This is also the case for all absorption refrigeration plants or absorption plants that provide refrigeration and heat pumping, notably for air-conditioning of buildings. In these cases exergetic analysis leads to equations in which some terms are positive and others are negative. This can pose problems in the definition of exergetic, or rational, efficiencies. In this paper ways of resolving these difficulties are discussed.

1. INTRODUCTION

Dans de nombreux systèmes techniques complexes, on observe la présence simultanée de flux de chaleur et de matière à des températures *supérieures* et d'autres flux à des températures *inférieures à celle de l'environnement*. Tel est par exemple, le cas de tous les procédés industriels cryogéniques, de production de froid, à partir d'une source de chaleur. C'est aussi le cas de toutes les frigopompes et thermo-frigo-pompes à absorption servant notamment à la climatisation des bâtiments.

Dans tous les cas, l'analyse exergetique du système conduit à des équations dont certains termes sont *positifs* et d'autres sont *negatifs*. Ceci entraîne des difficultés dans la définition des rendements exergetiques. Pour résoudre ces difficultés, les méthodes employées par les divers utilisateurs sont variées:

- Une première méthode consiste à prendre les valeurs *absolues* des termes négatifs et donc à faire des bilans des valeurs absolues;
- Une seconde méthode consiste à choisir comme référence une température soit supérieure, soit inférieures à *toutes* les températures du système, et donc indépendante de la température de l'environnement. Tous les termes ont alors le même signe;
- Enfin une troisième méthode consiste à admettre la présence de termes positifs et de termes négatifs et à faire des bilans algébriques.

Chaque méthode présente des avantages et des inconvénients, qui seront discutés sur deux exemples concrets. Dans les diagrammes les flèches \rightarrow représentent les directions

positives des interactions de chaleur. Les flèches \rightarrow représentent les directions positives des interactions de travail ou des interactions exergétiques.

2. UNE MACHINE CRYOGENIQUE

La Figure 1 représente une machine qui produit du froid à niveau cryogénique à partir d'une source de chaleur. Elle consiste en deux machines du cycle Stirling qui ont des performances réelles. Une des machines Stirling fonctionne entre la source de chaleur et l'environnement et fournit du travail à l'autre qui marche comme réfrigérateur cryogénique. La combinaison agit par interactions entre trois réservoirs thermiques, dont l'un est l'environnement.

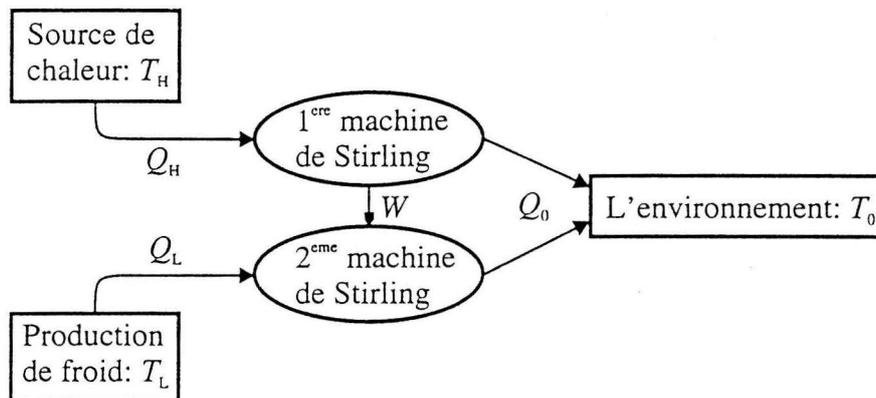


Figure 1: Machine cryogénique réelle et ses interactions.

Les températures sur la Figure 1 sont les températures sur les frontières de séparation entre la machine cryogénique et les trois systèmes extérieurs. Les températures et les interactions ont les valeurs suivantes:

$$T_H = 673 \text{ K}, T_L = 123 \text{ K}, T_0 = 293 \text{ K}$$

$$Q_H = 4500 \text{ W}, Q_L = 100 \text{ W}, Q_0 = 4600 \text{ W}.$$

Le coefficient de performance traditionnel est écrit comme suit:

$$COP \equiv \frac{Q_L}{Q_H} = \frac{100 \text{ [W]}}{4500 \text{ [W]}} = 0.022. \quad (1)$$

Pour mieux représenter les différentes valeurs des interactions de chaleur en termes du deuxième principe de la thermodynamique on multiplie les quantités de chaleur par le facteur de Carnot, $\theta = 1 - T_0/T$. Cela nous donne le rendement exergétique,

$$\psi \equiv \frac{Q_L \theta_L}{Q_H \theta_H} = \frac{100 \text{ [W]} \left(1 - \frac{293 \text{ [K]}}{123 \text{ [K]}}\right)}{4500 \text{ [W]} \left(1 - \frac{293 \text{ [K]}}{673 \text{ [K]}}\right)} = \frac{100 (-1.382)}{4500 (0.5646)} = -0.054. \quad (2)$$

Une valeur négative pour le rendement exergétique ne semble pas correcte. Si on utilise la première méthode pour résoudre la difficulté on prend la valeur absolue. Cela marche, mais on manque de justification rigoureuse pour cette action.

Si on utilise la deuxième méthode et choisit par exemple 1000 K comme température de référence pour le facteur de Carnot le rendement exergetique devient

$$\psi = \frac{100 \left(1 - \frac{1000}{123}\right)}{4500 \left(1 - \frac{1000}{673}\right)} = \frac{100 (-7.130)}{4500 (-0.4859)} = 0.326.$$

Egalement si on choisit par exemple 100 K comme température de référence on a

$$\psi = \frac{100 \left(1 - \frac{100}{123}\right)}{4500 \left(1 - \frac{100}{673}\right)} = \frac{100 (0.1880)}{4500 (0.8514)} = 0.0048.$$

Bien sûr on a résolu le problème de signes négatifs avec les deux dernières évaluations mais on a introduit d'autres problèmes. La température de référence, quelle qu'elle soit, plus haute ou plus basse que toutes les autres températures, est arbitraire. Donc les valeurs du rendement exergetique sont arbitraires. De plus apparait le problème du transfert de chaleur à l'environnement (Figure 1): il n'a plus la valeur zéro quand qu'il est multiplié par le facteur de Carnot. En ce cas ce transfert de chaleur devrait, peut être, entrer dans la définition du rendement exergetique (Equation 2).

Pour le cas de cette machine cryogénique le fait de suivre la troisième méthode ne nous aide pas pour résoudre la difficulté de signe, car le rendement exergetique reste négatif. Si on accepte la possibilité que le rendement exergetique puisse être négatif et si on accepte l'idée de prendre le bilan algébrique il nous reste un grand problème de logique: une meilleure version de la machine qui fournirait aussi de la chaleur à une température supérieure à celle de l'environnement pourrait avoir un rendement exergetique égal a zéro. Pour une machine utile ce serait une contradiction.

3. UNE THERMO-FRIGO-POMPE A ABSORPTION

La Figure 2 représente une machine à absorption, Le Goff et autres (1), qui utilise un réservoir de chaleur à haute température pour fournir du froid et de la chaleur à la climatisation d'un bâtiment. Elle agit par interactions entre quatre réservoirs thermiques, l'environnement inclus: c'est un quadripôle thermique, Le Goff et autres (2). Les températures et les flux de chaleur de la machine en Figure 2 sont les suivants:

$$T_H = 453 \text{ K}, T_M = 323 \text{ K}, T_L = 278 \text{ K}, T_0 = 293 \text{ K}$$

$$Q_H = 100 \text{ kW}, Q_M = 80 \text{ kW}, Q_L = 25 \text{ kW}, Q_0 = 45 \text{ kW}.$$

En termes d'énergie la performance est représentée par la sommation des flux de chaleur utile divisé par le flux de chaleur fourni:

$$COP = \frac{Q_L + Q_M}{Q_H} = \frac{25 \text{ [kW]} + 80 \text{ [kW]}}{100 \text{ [kW]}} = 1.05. \quad (3)$$

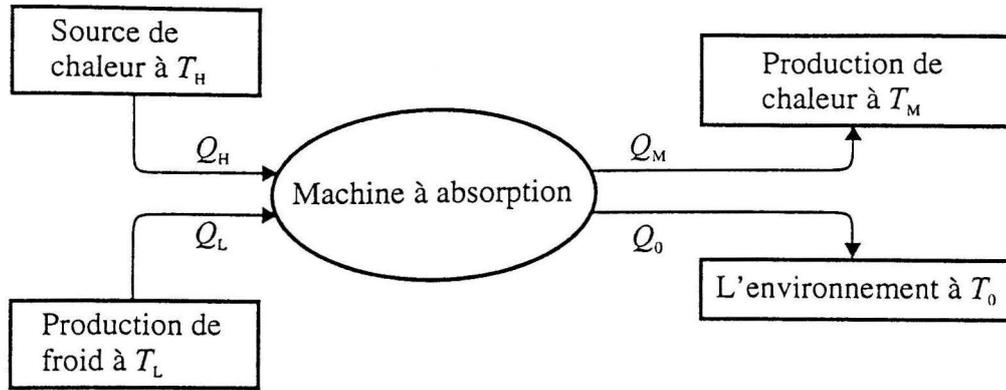


Figure 2: Une thermo-frigo-pompe à absorption qui utilise une source de chaleur pour produire simultanément du froid et de la chaleur pour la climatisation d'un bâtiment.

Le rendement exergetique est

$$\psi = \frac{Q_L \theta_L + Q_M \theta_M}{Q_H \theta_H} = \frac{25 \left(1 - \frac{293}{278}\right) + 80 \left(1 - \frac{293}{323}\right)}{100 \left(1 - \frac{293}{453}\right)} = \frac{-1.349 + 7.430}{35.32} \quad (4)$$

En utilisant la première méthode à traiter le terme de signe négatif on a

$$\psi = \frac{|-1.349| + 7.430}{35.32} = 0.249.$$

En utilisant la deuxième méthode à traiter les termes de signe négatif et en prenant par exemple 500 K comme température de référence on a

$$\psi = \frac{25 \left(1 - \frac{500}{278}\right) + 80 \left(1 - \frac{500}{323}\right)}{100 \left(1 - \frac{500}{453}\right)} = \frac{-19.96 - 43.84}{-10.38} = 6.15.$$

Ici on remarque un autre problème: un rendement exergetique qui peut être supérieur à unité. Egalement en prenant une température plus basse que toutes les températures, par exemple 250 K, on a

$$\psi = \frac{25 \left(1 - \frac{250}{278}\right) + 80 \left(1 - \frac{250}{323}\right)}{100 \left(1 - \frac{250}{453}\right)} = \frac{2.52 + 18.08}{44.81} = 0.460.$$

Enfin si on utilise la troisième méthode à traiter les termes de signe négatif on a encore

$$\psi = \frac{-1.349 + 7.430}{35.32} = 0.172.$$

On constate, sur ce dernier résultat, que si on néglige la production du froid, la machine aurait un rendement exergetique plus grand. A l'inverse, une machine qui produirait un

effet utile supplémentaire (production du froid) aurait un rendement exergetique plus petit qu'une qui ne le produirait pas. C'est une contradiction.

Encore ici, nous avons trouvé une gamme de valeurs pour le rendement exergetique. Les trois méthodes réussissent à donner des valeurs positives pour le rendement exergetique mais la première méthode est difficile à justifier. La deuxième méthode ne donne pas un rendement unique et peut donner une valeur supérieure à l'unité. La troisième méthode introduit des contradictions logiques.

4. UNE AUTRE APPROCHE AUX DIFFICULTES DE SIGNES

Nous proposons une solution qui surmonte les difficultés qui viennent d'être identifiées. Elle consiste en deux parties. La première partie est la définition rigoureuse du transfert d'exergie associé au transfert de chaleur et la deuxième consiste en une définition rigoureuse du rendement exergetique.

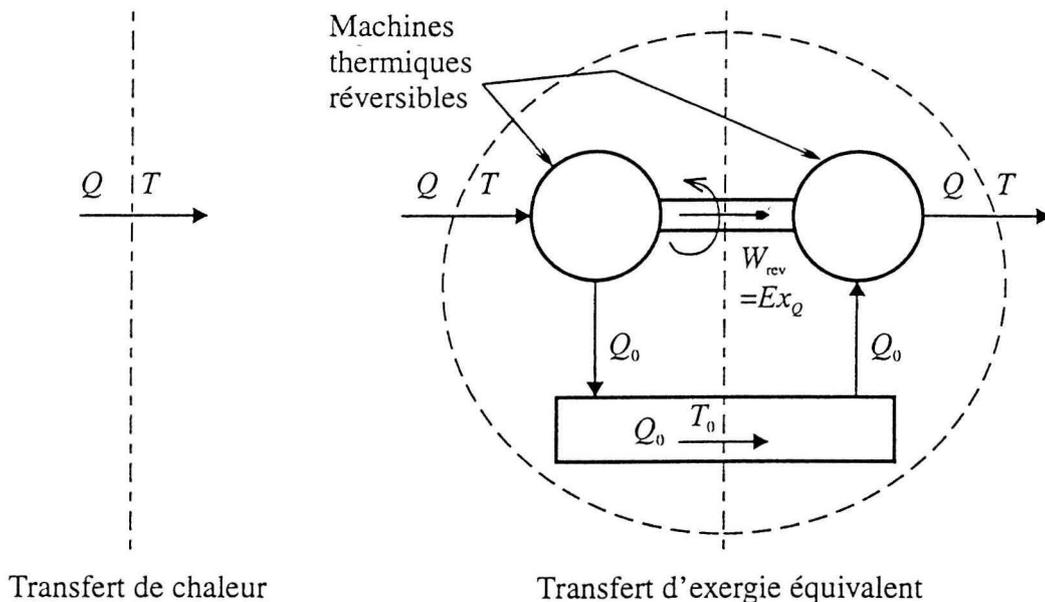


Figure 3: Transfert d'exergie associé à un transfert de chaleur, O'Toole et McGovern (3).

On voit que le transfert de chaleur à température T est remplacé par du travail du cisaillement réversible, qui égale le transfert d'exergie, et un transfert de chaleur à la température de l'environnement, qui en lui même n'apporte aucune exergie.

Le transfert d'exergie associé au transfert de chaleur

Le transfert d'exergie associé à la chaleur est illustré schématiquement sur la Figure 3. Il égale le travail qui serait fait par une machine thermique réversible qui recevrait la chaleur à la même température et rejeterait de la chaleur à la température de l'environnement. Une telle machine pourrait être couplée à une deuxième machine du même genre fonctionnant comme pompe à chaleur. Le transfert d'exergie est donné par l'Equation 5.

$$Ex_Q = Q \left(1 - \frac{T_o}{T} \right) = Q\theta. \quad (5)$$

On peut noter que si $T < T_0$, la machine thermique réversible à gauche de la Figure 3 fonctionne comme une pompe à chaleur réversible, celle à droite fournit du travail et l'interaction exergétique Ex_Q a la direction opposée à Q . Il est important donc de noter que non seulement la valeur mais aussi la direction de l'interaction de travail, ou d'exergie, est donnée par l'Equation 5.

La définition rigoureuse du rendement exergétique

La Figure 4 représente un système qui ne subit pas de changement net quand il réagit par interactions avec d'autres systèmes identifiés et avec l'environnement. Les symboles Ex_A à Ex_E et Ex_0 représentent les interactions exergétiques nettes. Les interactions exergétiques ont des valeurs positives et des directions indiquées par des flèches. En général les interactions exergétiques peuvent être associées à du travail, à de la chaleur, ou à une combinaison de travail et de chaleur ou à un transfert de matière. Ici on discute les interactions associées à de la chaleur. Si les directions des transferts de chaleur sont connues les directions des interactions exergétiques correspondantes sont données par l'Equation 5.

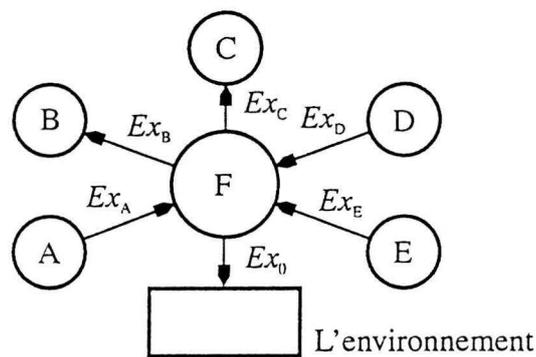


Figure 4: Les interactions exergétiques d'un système, F, qui ne subit pas de changement net, McGovern (4).

Il faut que la frontière du système qu'on analyse et les frontières de tous les systèmes extérieurs qui ont des interactions exergétiques avec le système soient définies et toutes les interactions exergétiques nettes évaluées. Selon le deuxième principe de la thermodynamique

$$\sum Ex_{\text{sortant}} \leq \sum Ex_{\text{entrant}} \quad (6)$$

Le rendement exergétique est défini par l'Equation 7. D'après Equation 6 il a une valeur maximum de un.

$$\psi = \left(\frac{\sum Ex_{\text{sortant}}}{\sum Ex_{\text{entrant}}} \right) \quad (7)$$

Pour les systèmes extérieurs influencent ψ . Par exemple, selon où est dessinée la frontière du système, Ex_0 système F en Figure 4

$$\psi_F = \left(\frac{Ex_B + Ex_C + Ex_0}{Ex_A + Ex_D + Ex_E} \right) \quad (8)$$

On peut noter que la définition de la frontière du système et les frontières des systèmes extérieures influencent ψ . Par exemple, selon où est dessinée la frontière du système, Ex_0 peut être zéro ou positif. Mais une fois que la frontière de séparation du système et des systèmes extérieurs est spécifiée, la valeur du rendement exergetique, qui est unique, est établie par les directions des interactions exergetiques et leurs valeurs. Pour la machine cryogénique de la Figure 1 les interactions exergetiques sont les suivantes:

$$Ex_H = Q_H \theta_H = 4500 \text{ [W]} \left(1 - \frac{293}{673} \right) = 2541 \text{ W}$$

$$Ex_L = Q_L \theta_L = 100 \text{ [W]} \left(1 - \frac{293}{123} \right) = -138.2 \text{ W}$$

$$Ex_0 = Q_0 \theta_0 = 4600 \text{ [W]} \left(1 - \frac{293}{293} \right) = 0 \text{ W.}$$

Le signe négatif de Ex_L indique que son sens est le contraire de celui de la flèche pour Q_L en Figure 1. La direction de l'interaction exergetique Ex_L est vers l'exterieur du système: elle représente de l'exergie sortante.

$$\psi = \frac{\sum Ex_{\text{sortant}}}{\sum Ex_{\text{entrant}}} = \frac{-Ex_L}{Ex_H} = \frac{138.2}{2541} = 0.054$$

Pour le système cryogénique de la Figure 2 les interactions exergetique sont les suivantes.

$$\dot{Ex}_H = \dot{Q}_H \theta_H = 100 \text{ [kW]} \left(1 - \frac{293}{453} \right) = 35.32 \text{ kW}$$

$$\dot{Ex}_M = \dot{Q}_M \theta_M = 80 \text{ [kW]} \left(1 - \frac{293}{323} \right) = 7.430 \text{ kW}$$

$$\dot{Ex}_L = \dot{Q}_L \theta_L = 25 \text{ [kW]} \left(1 - \frac{293}{278} \right) = -1.349 \text{ kW}$$

$$\dot{Ex}_0 = \dot{Q}_0 \theta_0 = 45 \text{ [kW]} \left(1 - \frac{293}{293} \right) = 0 \text{ kW}$$

Le signe négatif de Ex_L indique que son sens est le contraire de celui de la flèche pour Q_L en Figure 2. La direction de l'interaction exergetique Ex_L est donc vers l'exterieur du système: elle représente de l'exergie sortante. Il n'y a qu'une interaction exergetique entrante: Ex_H .

$$\psi = \frac{\sum Ex_{\text{sortant}}}{\sum Ex_{\text{entrant}}} = \frac{-Ex_L + Ex_M}{Ex_H} = \frac{1.349 + 7.430}{35.32} = 0.249$$

La méthode alternative proposée ici donne le même résultat que la première méthode pour la machine cryogénique et pour la machine d'absorption. Mais la méthode alternative le fait avec une justification rigoureuse. Elle fonctionne correctement dans tous les cas possibles. En utilisant la méthode alternative le besoin de prendre les valeurs absolues des

termes de signe négatif est éliminé. Par contre, la première méthode, bien qu'elle donne le bon résultat, a son origine dans le premier principe de la thermodynamique. Elle incorpore le facteur de Carnot comme correction pour les magnitudes des transferts de chaleur: ceci est un aspect du deuxième principe. Mais elle néglige l'importance de la direction d'un transfert de chaleur, qui est un autre aspect du deuxième principe. C'est à cause de cela qu'on est contraint d'introduire l'artifice de mettre les valeurs en absolues dans la première méthode.

5. CONCLUSIONS

Trois méthodes utilisées par les divers utilisateurs pour résoudre les problèmes de signes négatifs en analyse exergetique viennent d'être discutées dans le contexte de deux exemples concrets. Elles résolvent les problèmes de termes de signes négatifs mais soit elles manquent de justification rigoureuse, soit elles ne donnent pas de valeurs uniques, soit elles introduisent des contradictions logiques. Une méthode alternative est présentée qui a un fondement rigoureux et marche toujours. Elle utilise le facteur de Carnot pour fournir non seulement la valeur mais aussi la direction d'un transfert d'exergie correspondant à un transfert de chaleur. Elle utilise aussi la définition précise du rendement exergetique.

NOMENCLATURE

COP	coefficient de performance	θ	facteur de Carnot ($1-T_0/T$)
Q	flux de chaleur (W)	ψ	rendement exergetique
T	température absolue (K)	Ex	interaction exergetique (W)

BIBLIOGRAPHIE

1. LE GOFF, P., G. LOUIS et A. RAMADANE, Les pompes à chaleur à absorption multi-étagées: analyse exergetique: principes de réalisation, *Revue Générale de Thermique* (1988), no. 320 451–463.
2. LE GOFF, P., Z. AOUFOOSSI et G. LOUIS, Le concept de «quadripole exergetique» et ses applications, *Journal de Chimie Physique* (1988) 85 247–259.
3. O'TOOLE, F. et J. A. MC GOVERN, Some concepts and conceptual devices for exergy analysis, *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, 204 part C (1990) 329–340.
4. MC GOVERN, J. A., Exergy analysis — a different perspective on energy; Part 2: rational efficiency and some examples of exergy analysis, *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, 204 part A (1990) 263–268.