

Exergie et conversion d'énergie : application du second principe de la thermodynamique

Exergy and energy conversion : application of the second law of thermodynamics

François LANZETTA

Université Marie et Louis Pasteur, CNRS, institut FEMTO-ST, Belfort, France francois.lanzetta@univ-fcomte.fr

RÉSUMÉ. La valorisation des rejets thermiques issus des procédés industriels comme dans le bâtiment et le transport nécessite l'emploi de machines thermiques dont on cherche à augmenter l'efficacité. Cette article traite ainsi de la maximisation de la conversion d'énergie vue sous l'angle de l'exergie par l'application du second principe de la thermodynamique. L'objectif est, à travers certains critères de performance énergétique, d'optimiser le fonctionnement d'un convertisseur thermomécanique (moteur, réfrigérateur, pompe à chaleur) en minimisant les pertes thermiques et fluidiques et maximisant ainsi ses performances. Le second principe de la thermodynamique est ainsi utilisé de manière très concrète dans le but final pour nos sociétés de réduire les gaz à effet de serre et les consommations d'énergie primaire. Les performances d'un échangeur thermique air/air sont données en exemple.

ABSTRACT. The valorization of waste heat from industrial processes, as well as from building and transport, requires the use of thermal machines whose efficiency must be increased. This article deals with maximizing energy conversion from an exergy perspective, by applying the second principle of thermodynamics. The aim is to optimize the operation of a thermomechanical converter (engine, refrigerator, heat pump) by minimizing thermal and fluid losses, thereby maximizing its performance. The second principle of thermodynamics is thus put to very practical use, with the ultimate aim of reducing greenhouse gases and primary energy consumption. The performance of an air/air heat exchanger is given as an example.

MOTS-CLÉS. Entropie, exergie, second principe, conversion d'énergie, machines, échangeurs thermiques

KEYWORDS. Entropy, exergy, second law, energy conversion, machines, heat exchangers

1. Introduction

La conversion d'énergie thermique en énergie mécanique apparaît à travers les âges, depuis l'Antiquité jusqu'à nos jours. Depuis les premiers travaux d'Archimède (III^e siècle avant notre ère) ou de Héron d'Alexandrie (I^{er} siècle de notre ère) pour pomper de l'eau ou utiliser la force motrice de la vapeur, les ingénieurs n'ont cessé d'exploiter la chaleur comme source primaire d'énergie thermique. L'invention de la machine à vapeur associée au développement industriel de nos sociétés, dès le 17^e siècle a accéléré le développement d'une science nouvelle, la Thermodynamique. Sadi Carnot [1] a posé les fondations d'une science qui n'a cessé d'évoluer depuis 1824. Associée à la température, la chaleur, et sa dégradation, constitue la source de la plupart des inventions dans le domaine des machines et leur capacité à convertir cette énergie en une autre, plus apte à être utilisée, l'énergie mécanique. Si Carnot a conceptualisé les principes de conservation de l'énergie et d'irréversibilité (tableau 1), les travaux de Clausius, Gibbs, Boltzmann, Gouy et Stodola, entre autres, en ont formalisé les concepts et développé les approches telles que nous les connaissons de nos jours [2]. Rant a finalement introduit en 1956 le terme « exergie », en référence aux mots grecs EX (externe) et ERGOS (travail), permettant de définir

l'énergie technique disponible, et le mot « anergie » en 1964 caractérisant la part définitivement perdue de l'énergie [3]. De nos jours, les bilans d'exergie sont utilisés pour caractériser tout système de production d'énergie à partir de sources physiques, chimiques, électriques, magnétiques. L'introduction de critères économiques (coûts de production, maintenance, prix de l'énergie, etc.) permet alors d'effectuer des analyses exergo-économiques à différentes échelles, du process industriel technique [4] à la consommation d'énergie à l'échelle d'un pays [5].

Année	Auteur	Désignation
1824	Carnot	Puissance motrice du feu
1872	Thomson (Lord Kelvin)	Motivity
1873	Gibbs and Von Helmholtz	Available energy of the body and medium, free energy
1878	Gibbs	Esergy
1881	Gouy	Energie utilisable
1898	Stodola	Freie technische energie
1925	Debaufre	Available energy
1930	Darrieus	Exergy
1935	Bonsjakovic	Technische arbeitsfähigkeit
1941	Keenan	Availability in steady flow
1944	Thring	Virtue of energy
1953	Schmidt	Technische maximale arbeit
1955	Gibert	Energie non dégradée
1956	Grigull	Ekthalpie
1956	Rant	EXERGIE

Tableau 1 – Repères historiques [6-7]

Dans cet article, après avoir rappelé les grandes lignes de l'analyse exergétique, nous déterminerons, à travers un bilan exergétique, les performances, vues sous l'angle de l'efficacité exergétique, d'un échangeur thermique qui est un système de transfert de chaleur que l'on rencontre dans de très nombreux secteurs industriels (automobile, chimie, sidérurgie, bâtiment, biologie, alimentaire, etc.).

2. Concepts

Le premier principe de la thermodynamique traite de la conservation de l'énergie (en termes de quantités) et affirme que l'énergie ne peut être ni créée, ni détruite. Le deuxième principe établit, à travers la fonction d'état entropie, que le transfert d'énergie thermique s'accompagne d'irrégularités. Ce principe formule que l'énergie se dégrade au cours d'un processus, on parle alors de production d'entropie. Un système fournira le maximum de travail possible dans un processus réversible d'un état initial spécifié à l'état de son environnement, c'est-à-dire l'état de référence. Ce potentiel de travail utile est appelé exergie. L'exergie exprime ainsi la production maximale de travail réalisable dans l'environnement naturel, ou le travail minimum nécessaire pour réaliser le processus inverse [3].

On aura ainsi :

$$\text{Énergie} = \text{Exergie} + \text{Anergie} \quad (1)$$

La part d'énergie associée au travail définitivement perdu, est appelée destruction d'exergie ou anergie (1). Elle correspond au potentiel de travail gaspillé au cours d'un processus en raison d'irrégularités internes et externes au système étudié.

Le second principe traite donc de l'entropie, à laquelle on associe l'exergie, qui représentent des quantités non physiques, non soumises aux lois de conservation et ne pouvant être perçues par les cinq sens.

2.1. Sources d'irréversibilités

Au cours d'une transformation d'un système fermé produisant un travail W , avec un changement de volume $\Delta V = V_{\text{final}} - V_{\text{initial}}$ (avec $\Delta V > 0$ ou $\Delta V < 0$), un travail W_s est effectué sur l'environnement extérieur à la pression P_{ext} (figure 1) :

$$W_s = -P_{\text{ext}} \Delta V \quad (2)$$

Dans de nombreux cas, ce travail d'environnement ne peut pas être récupéré, ce qui réduit le travail utile W_u du processus :

$$W_u = W - W_s = W + P_{\text{ext}} \Delta V \quad (3)$$

D'autre part, on définit le travail réversible W_{rev} comme la quantité maximale de travail qui peut être obtenue d'un processus. La différence entre W_{rev} et W_u est appelée irréversibilité I , qui représente la quantité d'énergie détruite :

$$I = W_{\text{rev}} - W_u \quad (4)$$

Si $I = 0$, aucune entropie n'est générée. Pour les systèmes produisant du travail, $W_u \leq W_{\text{rev}}$.

Les sources d'irréversibilité sont nombreuses et elles sont génératrices de production d'entropie ou de destruction d'exergie. On peut distinguer de façon non exhaustive : le frottement (solide, fluide), le mélange de fluides, la turbulence, les réactions chimiques, le transfert thermique, les détentes non contrôlées, le laminage de fluide, les compressions rapides, les effets électriques (Joule, courants de Foucault), les déformations plastiques. On notera qu'un processus lent n'est pas synonyme de réversibilité et il peut également être source d'irréversibilité (décharge d'une batterie électrique, fonte de la glace).

La qualité d'une transformation ou d'un process thermodynamique peut s'exprimer en termes d'efficacités selon le second principe (η_{II}). Ainsi, on définira de différentes façons, les efficacités η_{II} :

$$\eta_{II} = \frac{\text{efficacité thermodynamique}}{\text{efficacité maximale possible}} = \frac{\eta}{\eta_{\text{Carnot}}} \quad (5)$$

$$\eta_{II} = \frac{\text{travail utile}}{\text{travail maximal}} = \frac{W_u}{W_{\text{rev}}} = 1 - \frac{I}{W_{\text{rev}}} \quad (6)$$

$$\eta_{II} = \frac{\text{exergie utile}}{\text{exergie à payer}} = 1 - \frac{\text{exergie détruite}}{\text{exergie à payer}} \quad (7)$$

2.2. Exergie et flux d'exergie pour un système ouvert

Considérons un système ouvert traversé par un fluide en écoulement (figure 1). Le volume de contrôle (vc) est le système étudié entre les instants t et $t+\delta t$ pour lequel δW_{vc} représente le travail technique reçu/fourni par le fluide au sein de ce volume. Par application du premier principe de la thermodynamique au volume de contrôle, en termes de flux, les équations de conservation de la masse par unité de temps (kg.s^{-1}), équation (8), et de conservation de l'énergie par unité de temps (W), équation (9), s'écrivent respectivement :

$$\frac{dm_{vc}}{dt} = \sum_{\text{entrée}} \dot{m}_e - \sum_{\text{sortie}} \dot{m}_s \quad \text{avec} \quad \frac{dm_e}{dt} = \dot{m}_e \quad \text{et} \quad \frac{dm_s}{dt} = \dot{m}_s \quad (8)$$

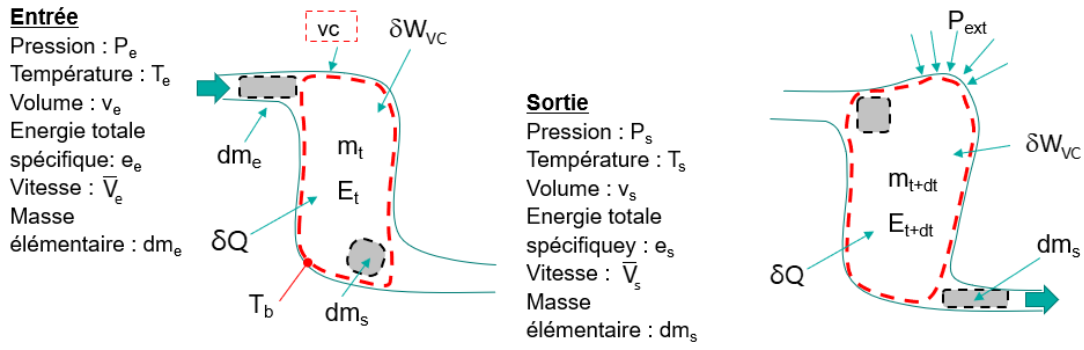


Figure 1 – Variation de l'état thermodynamique du système ouvert entre les instants t et t+dt.

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = \dot{W}_{vc} + \dot{Q}_{vc} + \sum_{\text{entrée}} \dot{m}_e \left(h_e + \frac{\bar{V}_e^2}{2} + gz_e \right) - \sum_{\text{sortie}} \dot{m}_s \left(h_s + \frac{\bar{V}_s^2}{2} + gz_s \right) \quad (9)$$

La variation du flux d'entropie à l'intérieur du volume de contrôle est égale au flux net d'entropie entrant et sortant, plus les changements de flux d'entropie induits par le transfert de chaleur et l'irréversibilité interne. Le second principe, en termes de flux ($W.K^{-1}$), s'écrit alors :

$$\frac{dS_{vc}}{dt} = \sum_{\text{entrée}} \dot{m}_e s_e - \sum_{\text{sortie}} \dot{m}_s s_s + \sum_j \frac{\dot{Q}_j}{T_{bj}} + \dot{\sigma} \quad (10)$$

Où $\dot{\sigma}$ est le taux de production d'entropie causé par la présence d'irréversibilité interne dans le volume de contrôle (cette quantité est toujours positive $\dot{\sigma} > 0$). On notera également T_{bj} la température de la frontière (paroi) du volume de contrôle traversée par le flux de chaleur $\dot{Q}_j$.

On définit alors le flux d'exergie (W) par l'expression générale :

$$\frac{dEx_{vc}}{dt} = \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_{bj}} \right) \dot{Q}_j + \dot{W} + P_{\text{ext}} \frac{dV_{cv}}{dt} + \sum_{\text{entrée}} \dot{m}_e \psi_e - \sum_{\text{sortie}} \dot{m}_s \psi_s - T_0 \dot{S}_{\text{gen}} \quad (11)$$

L'exergie spécifique ($J.kg^{-1}$) de l'écoulement de fluide $\psi = (h - h_0) - T_0(s - s_0) + \bar{V}^2/2 + gz$ est calculée par rapport à l'état de référence (h_0, s_0, T_0, P_0) de l'environnement choisi [2]. Les quantités $\bar{V}^2/2$ et gz représentent respectivement les énergies cinétique et potentielle spécifiques du fluide en écoulement.

La quantité $\dot{Ex}_{\text{dest}} = T_0 \dot{S}_{\text{gen}} \equiv \dot{\sigma}$ traduit le flux d'exergie détruite (potentiel de travail perdu). Ainsi, pour un processus irréversible $\dot{Ex}_{\text{dest}} \geq 0$, et pour un processus réversible $\dot{Ex}_{\text{dest}} = 0$.

3. Exemple d'application : l'échangeur de chaleur

Considérons le cas d'un échangeur air/air pour la climatisation d'un bâtiment (figure 2). Dans ce type de système, l'air chaud et vicié (air repris) est extrait d'un local et transmet une partie de son énergie thermique à de l'air froid extérieur (air neuf) qui entre dans le local afin d'être réchauffé. L'échangeur à contre-courant est traversé ainsi par deux flux d'air chaud et froid (chacun de débit massique $\dot{m}$,

chaleur spécifique c_p et constante du gaz r). Les écoulements génèrent des pertes de pression (ΔP) et de température (ΔT). On cherche ainsi à optimiser les performances thermiques de l'échangeur, c'est-à-dire, minimiser les flux d'entropie produite ou d'exergie détruite.

Appliquée à ce système à deux fluides entrants et sortants, l'équation (11) permet de déterminer le flux d'exergie (12) :

$$\frac{dEx_{vc}}{dt} = \left(1 - \frac{T_0}{T_b}\right) \dot{Q}_b + \dot{W} + P_{ext} \frac{dV_{cv}}{dt} + \dot{m}_1 (\psi_{1e} - \psi_{1s}) + \dot{m}_2 (\psi_{2e} - \psi_{2s}) - T_0 \dot{S}_{gen} \quad (12)$$

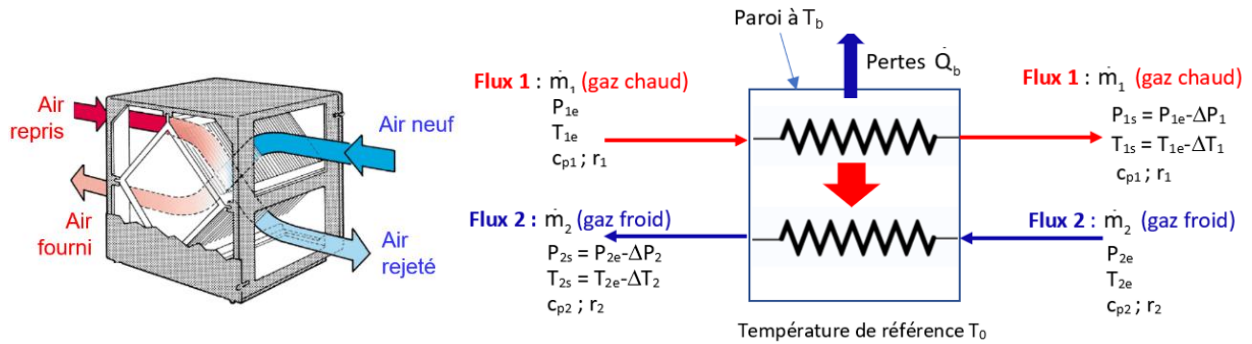


Figure 2 – Échangeur à plaques double flux et à contre-courant.

On considère que le régime est permanent, les énergies cinétiques et potentielles sont négligées par rapport aux variations d'enthalpies et d'entropies des deux fluides en écoulement. De plus, on suppose qu'il n'y a pas de travail mécanique (pas de ventilateur au sein de l'échangeur), ni de travail des forces extérieures exercées sur les parois de l'échangeur.

L'efficacité exergétique de l'échangeur s'écrit alors :

$$\eta_{ex} = 1 - \frac{\dot{Ex}_{dest}}{\dot{m}_1 (\psi_{1e} - \psi_{1s})} \quad (13)$$

$$\text{Avec } \psi_{1e} - \psi_{1s} = (h_{1e} - h_{1s}) - T_0 (s_{1e} - s_{1s}) \quad (14)$$

Le flux d'exergie détruite (d'après (12) et les hypothèses simplificatrices) s'exprime alors :

$$\dot{Ex}_{dest} = T_0 \dot{S}_{gen} = T_0 \left(\frac{\dot{Q}_b}{T_b} + \dot{S}_{\Delta P, f} + \dot{S}_{\Delta P, c} + \dot{S}_{\Delta T, f} + \dot{S}_{\Delta T, c} \right) \quad (15)$$

Dans cette dernière relation, on définit les flux d'entropie produits respectivement par les écoulements des fluides (gaz) froid et chaud en termes de :

- pertes de pression (pertes de charge) :

$$\dot{S}_{\Delta P, f} = \dot{m}_2 r_2 \ln \left(\frac{P_{2e}}{P_{2s}} \right) \text{ et } \dot{S}_{\Delta P, c} = \dot{m}_1 r_1 \ln \left(\frac{P_{1e}}{P_{1s}} \right) \quad (16a, b)$$

- pertes thermiques :

$$\dot{S}_{\Delta T, f} = \dot{m}_2 c_{p2} \ln \left(\frac{T_{2s}}{T_{2e}} \right) \text{ et } \dot{S}_{\Delta T, c} = \dot{m}_1 c_{p1} \ln \left(\frac{T_{1s}}{T_{1e}} \right) \quad (17a, b)$$

En fonction des conditions d'écoulement (pressions, vitesses, températures), des caractéristiques géométriques de l'échangeur (longueurs, diamètres hydrauliques des canaux, surfaces d'échange), on cherchera à minimiser le flux d'exergie détruite $\dot{E}_{x_{\text{dest}}}$ afin de maximiser l'efficacité exergétique η_{ex} de l'échangeur [8-9].

4. Conclusion

L'étude d'un système de conversion d'énergie, d'un processus thermodynamique au sens large du terme, à travers le second principe et l'exergie, permet ainsi de quantifier et de qualifier les échanges énergétiques et de matières en mettant l'accent sur les facteurs dissipatifs occasionnant des irréversibilités (fluidiques, thermiques) génératrices de dégradations d'énergie, vues sous l'angle de la production d'entropie ou de la destruction d'exergie. On peut ainsi déterminer l'efficacité exergétique d'un tel système à partir d'un bilan ayant pour intérêt d'identifier des destructions de quantités ayant la grandeur de l'énergie (J) ou de flux d'énergie (W).

Références bibliographiques

- [1] CARNOT S., *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*, Bachelier Libraire, 1824 (réédition Jacques Gabay 2005).
- [2] DINCER I., ROSEN M. A., *Exergy Analysis of Heating, Refrigerating and Air Conditioning: Methods and Applications*, Academic Press, 2015.
- [3] RANT Z., "Exergy, a new word for technical available work", *Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens* (in German), 22 (1956), p. 36-37.
- [4] KOC M., YUNUS E. Y. and OZTURK M., "Thermodynamic and exergo-economic assessments of a new geothermally driven multigeneration plant", *International Journal of Hydrogen Energy* 47.45 (2022) : 19463-19480. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.01.044>.
- [5] ERTESVÅG I. S., "Society exergy analysis: a comparison of different societies", *Energy* 26.3 (2001) : p. 253-270. [http://dx.doi.org/10.1016/S0360-5442\(00\)00070-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0360-5442(00)00070-0).
- [6] PREK M., BUTALA V., "Principles of exergy analysis of human heat and mass exchange with the indoor environment", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, Issues 25-26, 2010, p. 5806-5814. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.08.003>.
- [7] EVANS R., "A proof that exergy is the only consistent measure of potential work", *Ph. D. Thesis, Dartmouth College* (1969).
- [8] BEJAN A., Mamut E. (eds.), *Thermodynamic Optimization of Complex Energy Systems*, Vol. 69, Springer Science & Business Media, 2012.
- [9] DJETEL-GOTHE S., LANZETTA F. and BÉGOT S., "Second law analysis for the experimental performances of a cold heat exchanger of a stirling refrigeration machine", *Entropy* 22.2 (2020), p. 215. <http://dx.doi.org/10.3390/e22020215>.