

Chapitre 3. Thermodynamique des processus irréversibles**1. INTRODUCTION**

Pour concevoir et optimiser un procédé industriel quelconque, les ingénieurs utilisent des méthodes, la plupart du temps découplées, qui font appel à l'efficacité énergétique ou à d'autres grandeurs physiques d'une part, à une étude économique d'autre part. Cette méthodologie est fondamentalement et objectivement délicate à mettre en oeuvre car elle conduit, dans de nombreux cas à privilégier soit l'un, soit l'autre des critères : physique ou économique.

Pour les aspects physiques et notamment énergétiques, le seul intérêt des concepteurs va en général à la minimisation de la "consommation" d'énergie. Pour cela, ils font appel au rendement énergétique des systèmes qui est défini comme un rapport entre l'énergie utile et l'énergie utilisée, ces énergies pouvant être du même type ou de types différents (chimique, thermique, mécanique, électrique, etc.). Cette démarche découle directement des applications liées au premier principe de la thermodynamique, principalement à celle du bilan enthalpique dans le cas des systèmes ouverts, ce qui est le cas général des grands systèmes ou procédés. On sait cependant que le premier principe ne prend en compte que les quantités d'énergie (avec, au plan global, conservation de l'énergie prise sous toutes ses formes) sans aucune référence à la qualité qui est y associée selon le deuxième principe de la thermodynamique. Ainsi, disposer de 1 kWh d'électricité ou de 1 kWh de chaleur n'est pas équivalent, comme avoir 1 kWh de chaleur à température ambiante ou 1 kWh à très haute température. Ces différences trouvent une expression thermodynamique soit à travers l'entropie, soit à travers l'exergie dont l'avantage sur l'entropie est de s'exprimer en unité énergétique (J, Wh, cal, etc...) comme n'importe quel type d'énergie.

Associer l'exergie à l'énergie dans les analyses du fonctionnement des systèmes revient ainsi à associer quantité et qualité de l'énergie et de ses diverses formes ou types. L'analyse devient nettement plus riche qu'une simple analyse énergétique.

La thermo-économie et son emploi en vue d'une optimisation d'un système ou d'un procédé permet d'ajouter une dimension supplémentaire, celle des coûts et ceci dans un seul et même concept.

2. EXERGIE FLUX ET EXERGIE MATIERE**2.1. Exergie d'un système quelconque**

On trouve, dans la littérature scientifique, plusieurs définitions de l'exergie d'un système quelconque. On retiendra la suivante [1] : "*l'exergie d'une certaine quantité de matière*

contenue dans un système est une mesure du potentiel de production (ou de réception) d'un travail maximal (ou minimal) par le supersystème (constitué du système et de son milieu ambiant), qui permettra à cette quantité de matière d'être ramenée de son état initial à un état d'équilibre inerte avec le milieu ambiant".

La Figure 1 est une illustration de cette évolution d'un système quelconque d'un état initial à son état d'équilibre avec le milieu ambiant.

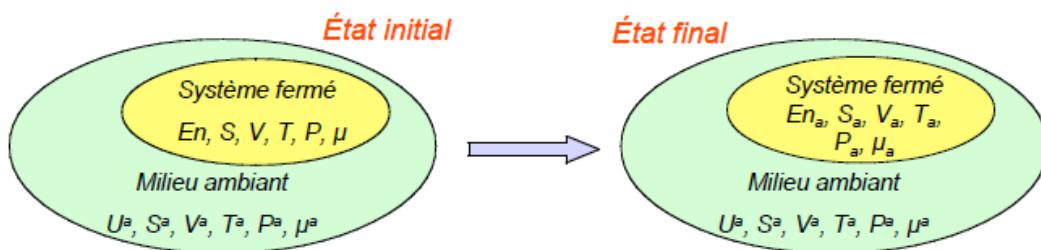


Figure 1 : Schématisation de l'évolution d'un supersystème

Considérant que le travail ne peut être maximum que lors d'opérations réversibles, c'est-à-dire sans création d'entropie, et que l'équilibre avec le milieu ambiant exige que les variables intensives du système et du milieu ambiant soient égales, on démontre que l'exergie du système dans son état initial est donnée par l'expression :

$$Ex = En - T_a S + P_a V - \sum_i \mu_{ia} N_i$$

ou, en, considérant un système thermomécanique dont l'énergie est constituée d'énergie interne, d'énergie cinétique macroscopique et d'énergie potentielle gravifique :

$$Ex = U + E_c + E_p - T_a S + P_a V - \sum_i \mu_{ia} N_i$$

Pour l'unité de masse de système et pour une évolution d'un état 1 à un état 2 :

$$\Delta ex_{12} = \Delta u_{12} + \Delta e_{c12} + \Delta e_{p12} - T_a \Delta s_{12} + P_a \Delta v_{12} - \sum_i \mu_{ia} \Delta n_{i12}$$

2.2. Exergie flux

Les énergies échangées entre un système et son environnement peuvent être qualifiées d'énergies flux [2]. L'énergie mécanique, l'énergie électrique et d'une manière générale, les énergies dites "nobles" sont, si on admet la réversibilité (ou la non création d'entropie), intégralement de l'exergie. En revanche, l'énergie thermique, même réversiblement, ne peut pas être transformée en énergie mécanique, à moins de disposer d'une source froide à température absolue nulle. En effet, la transformation réversible en énergie mécanique W

d'une quantité de chaleur Q à la température T nécessite l'utilisation d'un moteur de Carnot qui rejette une partie de cette énergie thermique à une source froide. En admettant, ce qui est un point de vue réaliste d'ingénieur, que la source froide dont on peut disposer gratuitement est le milieu ambiant à la température ambiante T_a , la part d'énergie thermique transformable en énergie mécanique est :

$$W = Q \left(1 - \frac{T_a}{T}\right) = \Theta Q$$

où Θ est le facteur de Carnot.

Ainsi, le contenu exergétique d'une quantité de chaleur échangée Q est :

$$Ex_Q = Q \left(1 - \frac{T_a}{T}\right)$$

La partie complémentaire de l'exergie est appelée anergie ; c'est la part d'énergie thermique non transformable en énergie noble :

$$An_Q = Q \frac{T_a}{T} \quad (6)$$

$$Q = Ex_Q + An_Q \quad (7)$$

La Figure 2 illustre les contenus exergétique et anergétique de diverses quantités d'énergie de types différents.

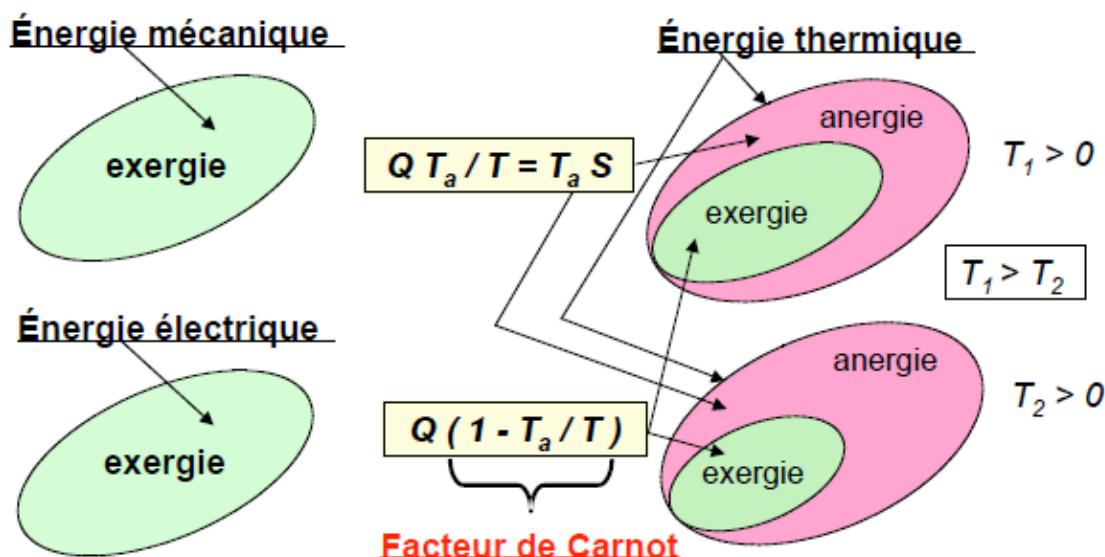


Figure 2 : Contenu exergétique de quelques types d'énergie

On peut noter que, pour l'énergie thermique, selon la valeur du facteur de Carnot, c'est-à-dire selon que la température considérée pour le flux de chaleur est supérieure ou inférieure à la température ambiante, le flux exergétique est soit du même signe (Figure 3a), soit du signe contraire (Figure 3b) à celui du flux thermique. A contrario, le flux anergétique est toujours du même signe que le flux thermique. On note qu'il lui est inférieur en quantité quand $T > T_a$; il lui est supérieur quand $T < T_a$ (Figures 3a et 3b).

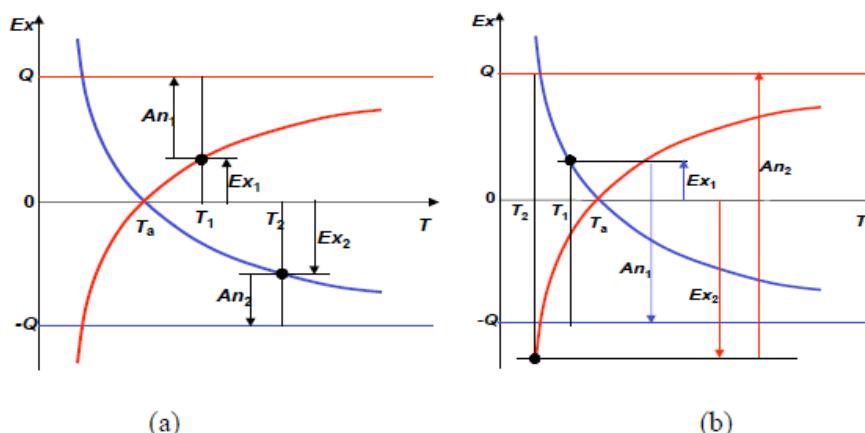


Figure 3 : Signe des échanges exergétiques et anergétiques en fonction du signe des échanges thermiques et de valeur de la température par rapport à la température ambiante

2.3. Exergie d'un fluide traversant un système thermique

Les fluides sont les principaux acteurs thermodynamiques des systèmes thermiques : machines et échangeurs, voire des procédés industriels. Or, lorsqu'un fluide traverse un système, il peut échanger du travail et de la chaleur avec son milieu extérieur (Figure 4).

L'énergie mécanique maximum ou exergie qu'il est capable de fournir est constituée, d'une part, de l'énergie mécanique échangée avec les éléments mobiles de la (ou des) machine(s) w_t (à l'exclusion des effets mécaniques dans les canalisations non récupérables en réalité), d'autre part, du travail récupérable par un moteur de Carnot à partir de l'énergie thermique cédée par le fluide. Ainsi, on peut écrire que la variation d'exergie par unité de masse du fluide est :

$$\Delta ex_{12} = w_{t12} + q_{12} \left(1 - \frac{T_a}{T} \right) \quad (8)$$

ce qui, avec l'expression du bilan enthalpique, donne :

$$\Delta ex_{12} = \Delta h_{t12} - T_a \Delta s_{12} \quad (9)$$

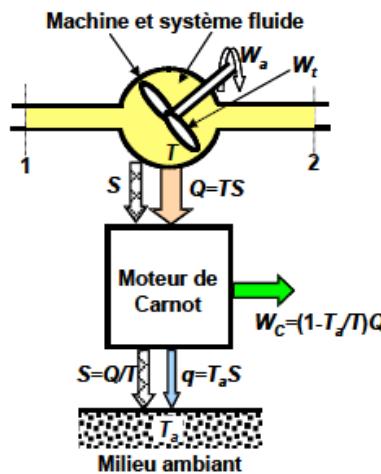


Figure 4 : Production d'énergie mécanique par un fluide en écoulement dans une machine (S correspond aussi à la variation d'entropie du fluide entre l'entrée et la sortie)

La part complémentaire, qui est l'énergie thermique cédée au milieu ambiant et donc non transformée en énergie mécanique, correspond à la variation d'anergie du fluide :

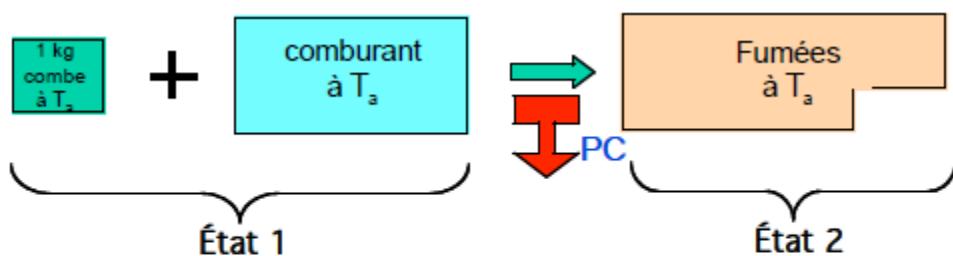


Figure 5 : Transformation d'un mélange combustible

En appliquant le résultat précédent à ce fluide particulier, utilisé dans certains moteurs thermiques, sa variation d'exergie (équation (9)), dans laquelle on admet que les variations d'énergies cinétique et potentielle sont négligeables et on note que la variation d'enthalpie est égale à l'opposé du pouvoir calorifique (PC), est donnée par :

$$\Delta Ex_{12} = -PC - T_a \Delta S_{12}$$

Si, par convention, on fixe à 0 la valeur de l'exergie des fumées en équilibre avec le milieu ambiant, l'exergie du mélange combustible contenant 1 kg de combustible et la masse d'air stoechiométrique correspondante est donnée par :

$$Ex_{mél comb} = PC + T_a \Delta S_{12} \quad (13)$$

Pour tenir compte de la réalité des moteurs thermiques, le pouvoir calorifique qui est considéré dans cette expression de l'exergie est, en général, le pouvoir calorifique inférieur (*PCI*).

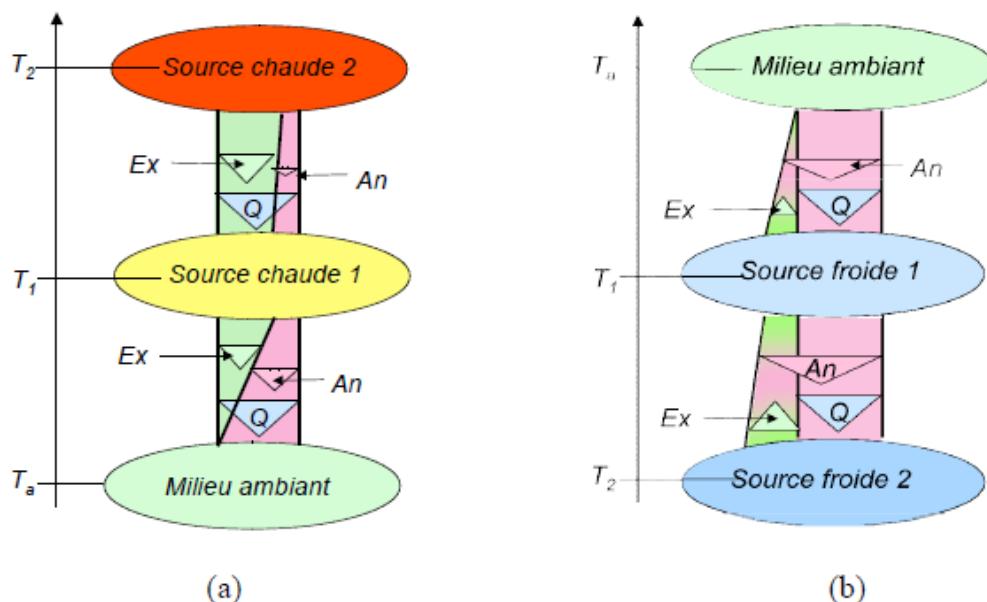
Dans certaines applications, le terme entropique est négligé, ce qui revient à admettre que l'exergie du mélange combustible est égale à son pouvoir calorifique. Une combustion de ce type est alors équivalente à un apport de chaleur à partir d'une source à température infinie (équation (5)). Cependant, si on prend l'exemple d'une combustion de méthane, la différence d'entropie entre l'ensemble combustible-air et les fumées (ΔS_{12}) est de -15 kJ/kg.K , ce qui revient à prendre, dans l'équation (13) et pour une température ambiante de 20°C , un terme entropique égal à $-4,4 \text{ MJ/kg}$ à comparer au *PCI* du méthane qui est de 50 MJ/kg environ. La prise en compte de ce terme donne comme équivalence combustion/source de chaleur, une source de chaleur à 3350 K .

2.5. Exergie et irréversibilités

Dans toutes les considérations précédentes, il apparaît un lien évident entre l'exergie et l'entropie. Cette dernière fonction étant directement liée aux irréversibilités des opérations pratiques, il en est de même de l'exergie.

2.5.1. Cas des exergies flux

Les Figures 6a et 6b mettent facilement en évidence la perte d'exergie, compensée par un gain d'anergie, lors d'un échange thermique irréversible entre deux sources (ou thermostats) à des températures différentes. On note également sur ces figures la conservation de l'énergie et l'inversion du sens d'échange de l'exergie par rapport à celui de la chaleur lorsque la température de la source est inférieure à la température ambiante (Figure 6b).



L'équation (9) met en évidence la propriété de fonction d'état de l'exergie, puisque l'enthalpie comme l'entropie sont des fonctions d'état, T_a étant une constante. En explicitant l'enthalpie à partir du bilan enthalpique et la variation d'entropie à partie du bilan entropique, l'équation (9) devient :

$$\Delta ex_{12} = w_{t12} + q_{12} \left(1 - \frac{T_a}{T} \right) - T_a s' \quad (14)$$

dans laquelle s' représente la création d'entropie massique due aux irréversibilités internes. Cette équation montre que, pour une certaine quantité d'énergies thermique et mécanique, l'exergie du fluide en sortie de système sera d'autant plus faible que la création d'entropie, donc les irréversibilités auront été plus importantes. On peut noter facilement, à partir de l'équation (10), que le résultat est inversé pour l'anergie :

$$\Delta an_{12} = T_a \frac{q}{T} + T_a s' \quad (15)$$