



**HAL**  
open science

**INTEGRATION DE L'ANALYSE EXERGETIQUE  
DANS LA CONCEPTION DE PROCEDES IDEAUX.  
CAS DE LA PRODUCTION DE FROID PAR  
TRANSFORMATION DE LA CHALEUR. EXEMPLES  
DE PROCEDE EXERGO-CHIMIQUE**

Driss Stitou, Spinner Bernard, Mickaël Sorin

► **To cite this version:**

Driss Stitou, Spinner Bernard, Mickaël Sorin. INTEGRATION DE L'ANALYSE EXERGETIQUE DANS LA CONCEPTION DE PROCEDES IDEAUX. CAS DE LA PRODUCTION DE FROID PAR TRANSFORMATION DE LA CHALEUR. EXEMPLES DE PROCEDE EXERGO-CHIMIQUE. VI Colloque Inter Universitaire Franco-Québécois, Thermiques des systèmes, May 2003, Montreal (Canada), Canada. hal-04818523

**HAL Id: hal-04818523**

**<https://cnrs.hal.science/hal-04818523v1>**

Submitted on 4 Dec 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# INTEGRATION DE L'ANALYSE EXERGETIQUE DANS LA CONCEPTION DE PROCÉDES IDEAUX. CAS DE LA PRODUCTION DE FROID PAR TRANSFORMATION DE LA CHALEUR. EXEMPLES DE PROCÉDE EXERGO-CHIMIQUE.

## STITOU Driss

IMP (Institut de Science et Génie des Matériaux et Procédés), Unité Propre 8521 du CNRS, Rambla de la Thermodynamique, Tecnosud, 66100 Perpignan (France)  
[stitou@univ-perp.fr](mailto:stitou@univ-perp.fr)

## SPINNER Bernard

IMP (Institut de Science et Génie des Matériaux et Procédés), Unité Propre 8521 du CNRS, Rambla de la Thermodynamique, Tecnosud, 66100 Perpignan (France)  
[spinner@univ-perp.fr](mailto:spinner@univ-perp.fr)

## SORIN Mickaël

LRDE (Laboratoire de Recherche en Diversification Energétique), CANMET, PO Box 4800, Varennes, Québec, Canada, J3X 1S6,  
[msorin@NRCan.gc.ca](mailto:msorin@NRCan.gc.ca)

## RÉSUMÉ

L'analyse de l'effectivité exergetique de procédés permet de distinguer les exergies non utilisées, produites mais inexploitées, ou produites en excès, de celle de l'utilité pour lequel le procédé est conçu. L'exemple traité ici, introduit la méthodologie de conception de procédés exergo-chimiques pour la production de froid par transformation de la chaleur

**Mots-clés:** Analyse exergetique, Procédés idéaux, Production de froid, Procédés à sorption,

## NOMENCLATURE

### Symboles utilisés

E : Exergie, J  
D : Pertes exergetiques, J  
Q : Quantité de chaleur, J  
T : Température, K ou °C

### Lettres grecques

$\eta$  : Rendement exergetique  
 $\xi$  : Productivité exergetique  
 $\varepsilon$  : Effectivité exergetique  
 $\Delta H$  : enthalpie J  
 $\theta$  : facteur de Carnot

### Indices

u : utile  
nu : non utilisé  
t : transférée  
in : inexploité  
ex : en excès

### Exposants

" : sortie  
' : entrée  
i : idéal

## INTRODUCTION

Les accords de Kyoto sont basés sur des conclusions conjointes liées à l'analyse de l'environnement et à celle du développement durable : les ressources énergétiques actuellement exploitées conduisent majoritairement à la production de gaz à effet de serre, dont les émissions sont réglementés à présent. Traditionnellement étudiée en termes d'analyse énergétique tel que:

- sécurité de l'approvisionnement énergétique,
- conservation de l'énergie,
- efficacité énergétique,

- contenu et temps de retour énergétiques,
- intensité énergétique....,

et conduisant respectivement aux ambiguïtés et questions suivantes :

- les énergies renouvelables sont largement suffisantes pour assurer la ressource énergétique mondiale,
- et le premier principe de la thermodynamique ?
- le moins de pertes de quelles formes énergétiques ?
- quelle forme d'énergie ?

Plusieurs études récentes soulignent que seule l'analyse exergetique permet de quantifier efficacement l'intérêt de nouvelles ressources, de les exploiter efficacement et économiquement, en tenant compte des contraintes

environnementales et de développement durable [1]. C'est la crise de l'exergie qu'il s'agit de résoudre [2].

Des solutions durables, aux sens du vrai potentiel des ressources mises en œuvre et des utilités avec un minimum de rejets, quelles que soient leurs formes énergétiques sont recherchés. Elles doivent nécessairement impliquer des fonctions de stockage et de transport, liées à l'utilisation de ressources et besoins temporels sur des sites différents.

L'analyse effectuée ici entre dans ce cadre et est basée sur une problématique de la production de froid. Si les premiers procédés industriels mis en œuvre utilisaient des sources de chaleur en vue d'une telle production (machines à absorption gaz/solution), l'avènement de la production électrique a conduit à la diffusion très largement majoritaire de systèmes à compression mécanique de vapeur. Ainsi le premier type de procédé n'est requis que pour des fonctions particulières comme des besoins de silence (réfrigérateurs d'hôtels), de non vibration (climatisation de tours), enfin de défaut d'approvisionnement électrique (camping/caravaning).

Ces deux types de procédés ont en commun leur mode de fonctionnement en continu or les demandes classiques et discontinues de froid conduisent à des demandes discontinues d'énergie primaire. Une telle particularité est totalement inadaptée avec la mise en œuvre de « ressources énergétiques nouvelles » comme l'énergie solaire thermique ou photovoltaïque, nécessitant des stockages efficaces de cette source primaire. Cependant le stockage de froid, par chaleur sensible ou latente, peut aussi être mis en œuvre dans cas mais ces solutions conduisent toutefois à des pertes exergetiques temporelles fatales, rédhibitoires au sens de la problématique de la crise exergetique.

De nouvelles solutions basées sur la mise en œuvre de dipôles exergetiques sont possibles. Leur principe, l'analyse de leurs performances idéales et réelles sont précédées par l'analyse des efficacités exergetiques des dipôles exergetiques.

On vérifiera que les fonctions originales de stockage, de transport de froid et chaleur sont intégrées dans les solutions proposées.

## 2. ANALYSE DES EFFICACITÉS EXERGETIQUES DE PROCÉDÉS IDÉAUX ET RÉELS.

Au-delà de la définition classique du rendement exergetique établie par Grassman [3] et basée sur le rapport de l'ensemble des exergeties sortantes  $E''$  et des exergeties entrantes  $E'$  dans un système :

$$\eta_G = \frac{E''}{E'} = 1 - \frac{D}{E'} \quad (1)$$

où  $D$  représente l'exergie détruite par les irréversibilités résultant de la mise en œuvre réelle du système.

Brodyanski et al. [3] et Le Goff et al. [4] distinguent l'efficacité exergetique (efficiency)  $\eta_G$  définie par Grassman (Eq. 1) du rendement exergetique  $\xi$  (yield ou productivité) par le rapport de l'exergie utile produite  $E_u''$  à l'exergie entrante  $E'$  :

$$\xi = \frac{E_u''}{E'} = 1 - \frac{D + E_t''}{E'} \quad (2)$$

où  $E_t''$  est l'exergie des sous produits transférée à d'autres procédés et l'effectivité exergetique par le rapport de l'exergie nette sortante à l'exergie nette entrante :

$$\varepsilon = \frac{E_u''}{E' - E_t''} \quad (3)$$

Dans une analyse plus récente, Sorin et al. [6,7] caractérisent l'exergie  $E'_{nu}$  non utilisée dans un système idéal (I), de l'exergie  $(E' - E'_{nu})$  qui va effectivement être convertie en une autre forme énergétique, ou transformée dans la même forme énergétique (Figure 1).

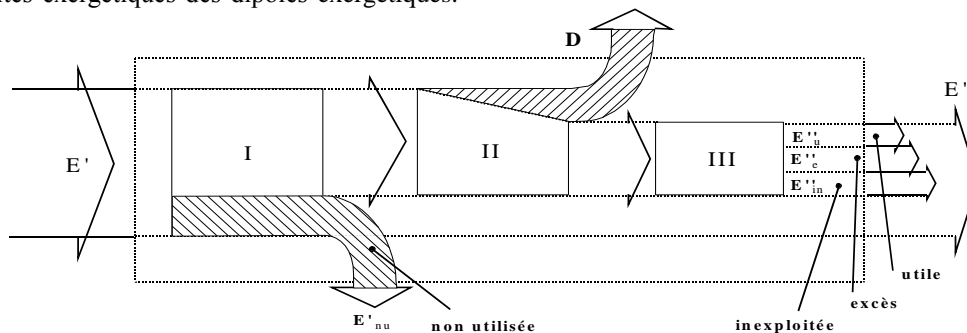


Figure 1 : Schéma de conversion de l'énergie dans les procédés composés de manière virtuelle de 3 sous procédés : I – idéal, II – réel, III – réel distinguant les exergeties utiles des inexploitées et des rejetées

L'exergie détruite  $D$  par la conversion ou transformation énergétique dans le système réel (II) est à soustraire de l'exergie  $(E' - E'_{nu})$  ce qui va conduire, à la sortie du procédé global à 3 types d'exergeties :

- $E''_u$  utile pour laquelle le système a été conçu,

- $E''_{in}$  inexploitée dans le cadre du système mis en œuvre (le concept de l'intégration des procédés devra conduire à utiliser cette source, et non la rejeter),
- $E''_{ex}$  produite en excès.

L'identification de l'exergie non utilisée dans le système idéal (Fig. 1) permet de définir le rendement de conversion (ou ici de transformation)  $x_e$  caractérisant la qualité du sous-procédé idéal I, ainsi que la sélectivité définissant la qualité de la production d'exergie au niveau des exergies inexploitées et en excès. Ainsi, on désignera par :

- rendement de conversion :  $x_e = \frac{E' - E'_{nu}}{E'}$  (4)

- sélectivité :  $e_w = \frac{E''_{ex} + E''_{in}}{E'}$  (5)

- effectivité exergetique ( yield ) :  $\eta_{ex} = \frac{E''_u}{E'}$  (6)

conduisant à

$$\eta_{ex} = x_e - d - e_w \quad \text{pour un système réel avec } d = D/E' \quad (7)$$

et  $\eta_{ex}^i = x_e - e_w$  pour un système idéal (8)

Il s'agit bien sûr de maximiser  $x_e$  et de minimiser  $e_w$  lors de la conception de la structure du système idéal, ce qui est une démarche totalement nouvelle. Le choix des éléments du procédé, leurs dimensionnements sera guidé par l'équipartition des pertes exergetiques (ou des créations d'entropie) [8], aspect qui ne sera pas abordé ici.

Il en est de même des performances énergétiques en terme de puissance, qui imposeront pour sa maximisation, une effectivité exergetique pratique égale à 1/2 [9].

### 3. ANALYSE DES DIPÔLES EXERGETIQUES POUR LA MISE EN ŒUVRE DE SYSTÈMES DE PRODUCTION DE FROID À PARTIR DE CHALEUR, IMPLIQUANT DES FONCTIONS DE STOCKAGE ET DE TRANSPORT D'UNE TELLE PRODUCTION.

Un dipôle exergetique est défini par un système fermé recevant de la chaleur et délivrant de la chaleur par transport

d'un gaz actif issu d'une part d'un premier processus physico-chimique endothermique et consommé d'autre part par un second un processus physico-chimique.

Le caloduc ou thermosyphon est la base même d'un tel dipôle exergetique, où le même processus physico-chimique est mis en œuvre dans chaque pôle. Il s'agit dans ce cas particulier d'une évaporation endothermique et d'une condensation exothermique mettant en oeuvre un même processus physico-chimique de changement d'état liquide/gaz d'un corps pur. Idéalement, les niveaux de température et les quantités de chaleur transportées sont égales aux deux extrémités du dipôle : l'exergie entrante  $E'$  est totalement transportée vers la sortie.

D'autres processus physico-chimiques différent du changement de phase peuvent aussi être mis en œuvre, comme par exemple :

- la réaction réversible entre un solide et un gaz. Ce processus qui peut être soit endothermique soit exothermique est mono-variant comme le changement de phase. On retrouvera idéalement les mêmes performances que le caloduc si la même réaction est mise en oeuvre dans chaque pôle (si toutefois l'expression linéaire dans une gamme de pression non excessive de l'équation de Clausius-Clapeyron est respectée);
- l'absorption d'un gaz dans un liquide (solution saline ou solution binaire) ou l'adsorption d'un gaz sur une surface développée d'un solide (charbon actif ou zéolithe). De tels processus sont divariants cette fois, on retrouvera la quantité de chaleur à la sortie égale à celle de l'entrée (avec la même restriction que ci-dessus), mais à un niveau de température différent, et variable durant le processus mis en œuvre (Fig. 2).

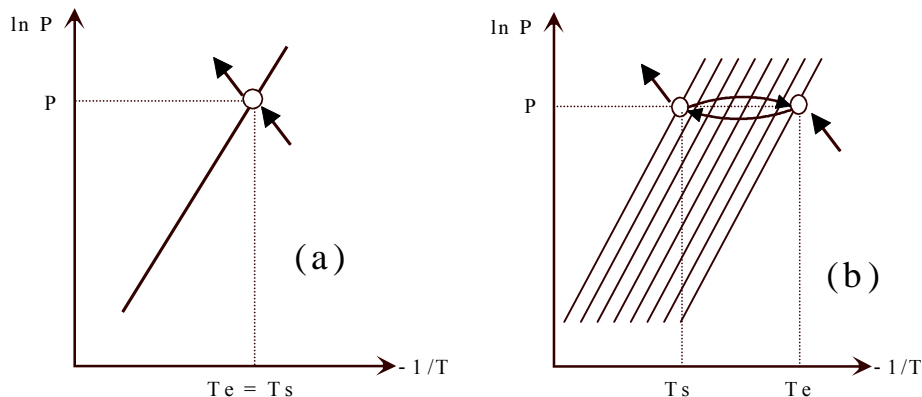


Figure 2 : Représentation dans le diagramme de Clausius – Clapeyron ( $\ln(P)$  vs  $-1/T$ ) d'un processus monovariant (a) et d'un processus divariant (b)

Si deux processus physico-chimiques différents sont mis en oeuvre cette fois, les niveaux de température ainsi que les quantités de chaleur correspondantes sont différents. On ne

considèrera ici que des systèmes monovariants pour simplifier la présentation de cette analyse.

En supposant qu'aucune perte de quantité de mouvement ne vienne modifier les pressions des processus physico-chimiques mis en œuvre (perte de charge), la relation de Clausius-Clapeyron permet de relier la pression P et la température T de ces processus mis en œuvre dans le diagramme de la figure 3.

Cette figure montre clairement qu'un processus physico-chimique 1 comme la condensation / évaporation d'enthalpie  $\Delta H_{C/E}$  mis en œuvre avec une processus physico-chimique 2, comme une réaction solide-gaz d'enthalpie  $\Delta H_R$ , conduit :

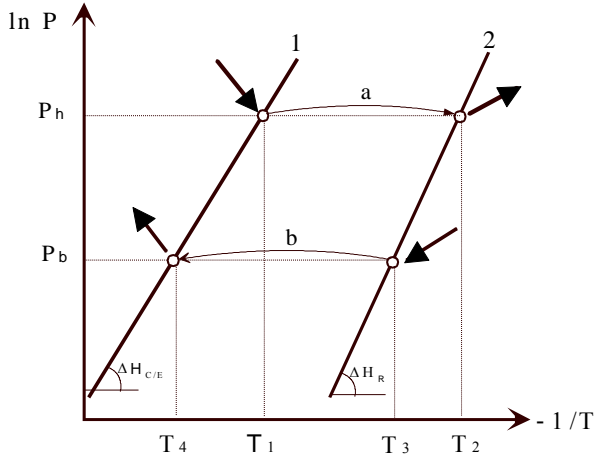


Figure 3 : Représentation dans le diagramme de Clausius-Clapeyron de la mise en œuvre de deux processus physico-chimiques différents conduisant dans deux modes de fonctionnement à la définition de deux dipôles

- à une remontée du potentiel thermique de  $T_1$  à  $T_2$  dans le dipôle (a)

- à une dégradation du potentiel thermique de  $T_3$  à  $T_4$  dans le dipôle (b)

La dégradation nécessaire, au sens du second principe, du potentiel thermique dans le dipôle (b) permet ainsi la remontée du potentiel thermique dans le dipôle (a). S'agissant de machines idéales, l'exergie entrante est donc conservée à la sortie :

$$\Delta H_R \cdot \theta_3 + \Delta H_{C/E} \cdot \theta_1 = \Delta H_R \cdot \theta_2 + \Delta H_{C/E} \cdot \theta_4 \quad (9)$$

### 3.1 Mise en œuvre de dipôles pour la production de froid au niveau $\theta_c$ à partir de chaleur au niveau $\theta_h$ avec une effectivité exergetique idéale $\eta_{ex}^i = 1$ .

Une telle effectivité impose que  $x_e = 1$  (soit une exergie non utilisée  $E''_{nu} = 0$ ), ainsi que  $e_w = 0$  (soit des exergie produite en excès ou inexploitées  $E''_{in} = E''_{ex} = 0$ ). Ceci peut être obtenu en agissant sur les conditions opératoires du procédé, c'est à dire que le niveau de température du processus physico-chimique exothermique mis en œuvre dans le dipôle (b), soit  $T_4$  (figure 3) soit égal à la température ambiante  $T_0$  (donc de niveau exergetique  $\theta_0 = 0$ ). En effet, si  $T_4$  était supérieure à  $T_0$ , une partie de l'exergie entrante  $\Delta H_R \cdot \theta_3$ , égale à  $\Delta H_{C/E} \cdot \theta_4$  ne serait pas utilisée.

De même, l'exergie du froid produit (chaleur entrante dans le dipôle (a), mais à un niveau  $T_1 < T_0$ ) conduisant donc à une exergie sortante du système ( $\theta_1 < 0$ ), doit être égale à  $E''_u$ , exergie utile pour laquelle le système est conçu, avec  $E''_{in}$  et  $E''_{ex}$  égaux à 0. Ceci n'est possible que si  $\theta_2 = \theta_0$  et si  $T_1$  est bien le niveau de froid exactement désiré. Le diagramme de Clausius-Clapeyron et le diagramme  $\theta = f(Q)$  correspondant sont représentés sur la figure 4.

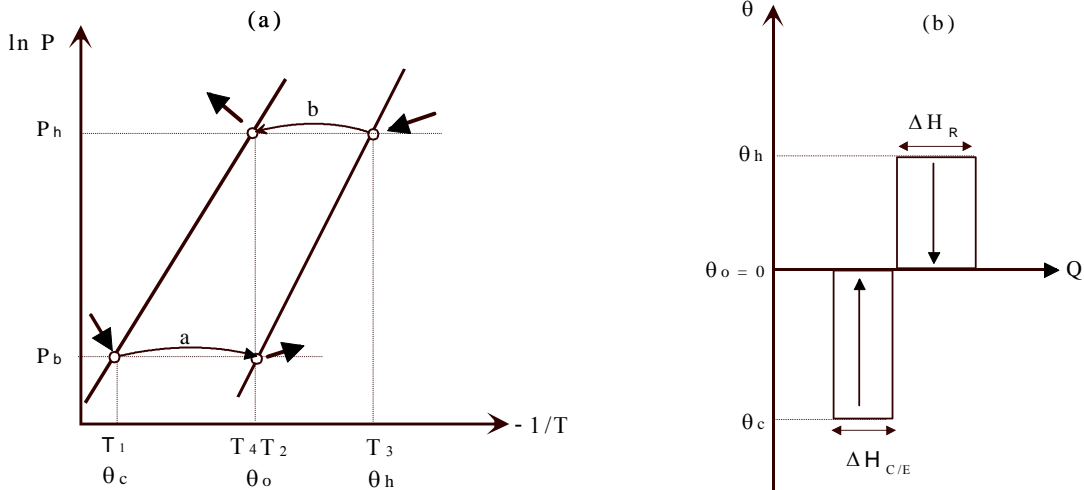


Figure 4 : Représentation dans le diagramme de Clausius –Clapeyron (a) et dans le diagramme  $\theta = f(Q)$  (b) de la mise en œuvre de deux dipôles thermiques conduisant à un procédé de production de froid d'effectivité exergetique de 1

La figure 4a est relative à la représentation classique du système de production de froid par sorption, alors que la figure 4b montre que dans ces dipôles, les exergies mises en œuvre (cf. Equ. 9) impliquent une extensité constante  $\Delta H_r$  (ou  $\Delta H_{C/E}$ ) associée à un changement de potentiel ( $\theta_h - \theta_o$ ) (ou respectivement  $\theta_c - \theta_o$ ). Ici, les performances idéales sont caractérisées par :

$$\eta_{ex}^i = \frac{\Delta H_{C/E} \cdot \theta_c}{\Delta H_r \cdot \theta_h} = 1 \quad (10)$$

or  $COP_i = \frac{\Delta H_{C/E}}{\Delta H_r}$  et donc  $COP_i = \frac{\theta_h}{\theta_c}$  (11)

La relation entre  $\theta_h$  et  $\theta_c$  conduit donc directement à la valeur maximale des performances énergétiques qualifiées au travers du  $COP_i$ . Par conséquent, si on désire une efficacité énergétique égale à 1 basé sur ce procédé idéal (ayant donc une effectivité exergetique de 1), la relation ci dessus impose l'égalité en valeurs absolues des facteurs de Carnot :  $\theta_h = \theta_c$ . Ainsi, si  $T_c = -30^\circ C$ , alors  $T_h$  doit être égal à  $87^\circ C$  pour  $T_0 = 10^\circ C$ .

D'autres dipôles peuvent être mis en œuvre pour conduire au même résultat : il suffit par exemple que le trajet dans le diagramme  $\theta = f(Q)$  conduise à une croissance, puis à une décroissance du potentiel exergetique, telle que représentée

figure 5, tel que le bilan exergetique soit semblable au précédent.

La représentation de ces dipôles dans le diagramme de Clausius- Clapeyron (Figure 5b) montre que trois processus physico-chimiques sont à mettre en œuvre, dans 3 dipôles a, b et c, avec une connexion thermique entre les dipôles a et c. Comme précédemment, la mise en œuvre du dipôle a, siège de la production de froid, peut être temporelle et dissociée du fonctionnement temporel du dipôle b considéré comme régénérateur.

D'autres mises en œuvre de dipôles, basées sur d'autres représentations d'exergies comme dans la figure 5a font l'objet d'un développement en cours de publication.

### 3.2 Mise en œuvre de dipôles pour la production de froid au niveau $\theta_c$ à partir de chaleur au niveau $\theta_h < \theta_h$

Il est clair, d'après (10), que le  $COP_i$  maximal implique des niveaux de température suivant (11). D'après les enthalpies des processus physico-chimiques mis en œuvre, en particulier dans le cas classique de la figure 5b, si  $\Delta H_{R3} > \Delta H_{R2} > \Delta H_{R1}$  comme c'est le cas pour des processus physico-chimiques habituels, la valeur de  $\theta_h$  doit croître, si l'on veut obtenir un niveau de froid désiré  $\theta_c$ .

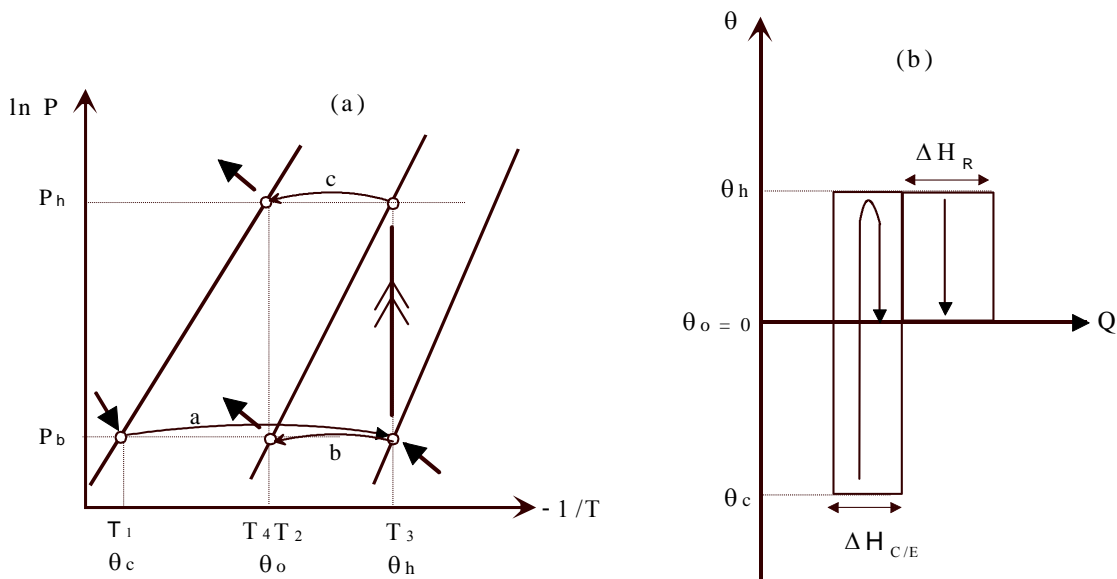


Figure 5 : Représentation dans le diagramme de Clausius –Clapeyron (a) et dans le diagramme  $\theta = f(Q)$  de la mise en œuvre de trois dipôles thermiques conduisant à un procédé de production de froid d'effectivité exergetique de 1

Par ailleurs, il est souvent désiré un niveau de production de froid effectivement à  $T_c$ , obtenu à partir d'un niveau de chaleur le plus bas possible, compatible en particulier avec une source de chaleur comme le solaire dont le rendement de captation est fonction du niveau de température obtenu. Il est clair, à partir de (10), qu'à ce moment là, l'effectivité exergétique doit être de valeur inférieure à l'unité ou alors le nouveau  $COP^i$  doit être inférieur à  $COP^i$ . Par exemple si  $\theta_h = 1/2 \theta_h$  alors la relation (11) implique  $COP^i = 1/2 COP^i$ .

Ainsi donc, tout en conservant une efficacité exergétique  $\eta_{ex}^i$  égale à 1, il est possible de caractériser idéalement des combinaisons de dipôles permettant ce type de performances comme cela est représenté figure 6. Par exemple dans le cas où  $T_c$  est égal à  $-30^\circ C$ , alors  $T_h = 44^\circ C$ . D'autres combinaisons de dipôles font l'objet d'une publication ultérieure.

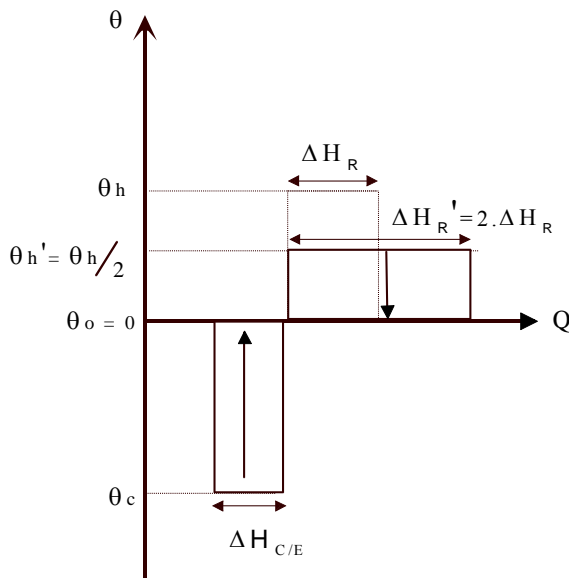


Figure 6 : Représentation dans le diagramme  $\theta = f(Q)$  d'un procédé permettant, par la mise en oeuvre de dipôles thermiques utilisant une source de chaleur à  $Th'$  d'atteindre des performances similaires à un procédé nécessitant une entrée de chaleur à  $Th > Th'$

#### 4. CONCLUSIONS

L'analyse des dipôles exergétiques basés sur la mise en oeuvre de processus physico-chimiques impliquant le transfert d'un gaz montre, sur l'exemple de la production de froid à partir de chaleur, qu'un nombre élevé de solutions de couplages de dipôles est possible. Une telle analyse peut s'appliquer très simplement à d'autres objectifs de gestion de la chaleur comme l'amplification de la quantité de chaleur produite (effet pompe à chaleur) ou celle du niveau de température (effet de thermo-transformation).

Ces solutions doivent impliquer des effectivités exergétiques idéales de 1 qui permettront de rechercher la structure optimale du système idéal. Il est clair que le COP (ou

COA) du système, exprimant des relations propres au 1<sup>er</sup> principe, dépendra des niveaux de température désirés en entrée d'exergie.

Cette méthode se révèle être un excellent moyen pour la synthèse de structure idéale de procédés de gestion de la chaleur, les procédés exergo-chimiques, et doit pouvoir être étendu à la conception de procédés de conversion de formes d'énergie variées entrant dans le cadre de la problématique décrite en introduction. On analysera en particulier les transformateurs de potentiels chimiques récemment développés [10].

#### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]. Rosen et I. Dincer, 2001, Exergy as the confluence of energy, environment and sustainable development, Exergy, 1 (2001) 3-13
- [2]. A. Rosen, Energy crisis or exergy crisis?, 2002, Exergy, 2 (2002) 125-127
- [3]. P. Grassman (1950), Zur allgemeinen Definition des Wirkungsgrades, Chem. Eng. Technik, 4 (1950), 70-73
- [4]. V.M. Brodyansky, M. Sorin et P. Le Goff, 1994, The efficiency of industrial processes, exergy analysis and optimization, Amsterdam Elsevier Science Publishers BV.
- [5]. P. Le Goff, T. Cachot, A. Lasalle et M.S. Rahbar, 1995, Comment évaluer la performance d'un convertisseur d'exergie : rendement ou efficacité ou effectivité? Com. JETC IV, Nancy (France), Sept 1995, 181-188.
- [6]. M. Sorin, B. Spinner et D. Stitou, (1999), Approche exergétique pour la conception des réfrigérateurs thermochimiques solide-gaz, Colloque franco-québécois, Thermique des systèmes à température modérée, (1999), 119-121.
- [7]. M. Sorin, B. Spinner et D. Stitou, (2002), Thermodynamic techniques for the conceptual design of thermochemical refrigerators using two salt materials, Chem. Eng. Sci., 57, (2002) 4243-4251
- [8]. D. Tondeur et E. Kvaalen, 1987, Equipartition of entropy production. An optimality criterion for transfer and separation processes, Ind. Chem. Res., 26 (1986) 50-56
- [9]. P. Neveu, 2002, Apports de la thermodynamique pour la conception et l'intégration des procédés, Univ. Perpignan, Habilitation à Diriger des Recherches, 10 décembre 2002
- [10]. G. Lin, J. Chen et C. Wu, 2002 The equivalent combined cycle of an irreversible chemical potential transformer and its optimal performance, Exergy, 2 (2002) 119-124