

ANALYSE DES FLUX INTERNES D'ENERGIE DANS LES THERMOTRANSFORMATEURS A SORPTION

B. Spinner¹, D. Stitou¹ et M. Sorin²

¹ IMP, Institut de Science et Génie des Matériaux et Procédés, CNRS-UPR 8521, Site Carnot, Rambla de la Thermodynamique, 66100 Perpignan, Cedex, France.

² Energy Diversification Research Laboratory, CANMET, 1615 Lionel-Boulet, P.O. Box 4800, Varennes, Quebec, J3X 1S6, Canada.

RESUME

Une analyse nouvelle des structures possibles de procédés à sorption permettant la remontée du potentiel thermique d'une source de chaleur est quantifiée par la productivité exergetique ideale, conduisant à la caractérisation des structures utilisant au mieux l'exergie d'entrée. Les exemples retenus dans le cas des systèmes thermo-chimiques à base d'ammoniacates illustrent cette démarche.

ABSTRACT

This paper describes a new type of analysis to generate possible structures of sorption heat transformers based on ideal exergy productivity. The obtained structures are compared and regarding their best use of entrance exergy. Examples of thermo-chemical systems using ammoniacates are used to illustrate the methodology.

MOTS CLEFS

Analyse exergetique ; thermotransformateurs à sorption ; édification de systèmes de conversion d'énergie.

1. INTRODUCTION ET SITUATION DU SUJET

L'analyse de l'intégration de procédés de conversion énergétiques implique habituellement une approche basée sur l'adéquation entre les sources et puits énergétiques d'une part, les demandes et rejets du procédé à mettre en œuvre d'autre part, enfin les irréversibilités. Dans le cas où les sources et puits, demandes et rejets sont uniquement thermiques, il ne s'agit de mettre en œuvre que des transformations énergétiques dans ces procédés, comme l'a souligné Britnich et Hebecker (1), et non de la conversion comme le traite Alefeld et Radermacher (2). Les procédés à sorption, basés sur la thermicité de l'absorption entre un gaz et une solution, ou l'adsorption d'un gaz avec un solide, ou encore la réaction d'un gaz avec un solide répondent totalement à ce critère de procédé à transformation énergétique, que les finalités soient la production de chaleur à température donnée, la production de froid, la production combinée de froid et chaleur combinant les deux modes précédents, ou enfin la remontée du potentiel thermique (mode thermotransformation).

L'analyse exergetique sur de tels systèmes de transformation de l'énergie thermique est particulièrement adaptée, surtout après la récente démonstration de Le Goff et al (3) démontrant que le choix de la température de référence T_0 n'intervenait pas dans de telles analyses. Toutefois, il ne s'agit pas ici d'analyser les irréversibilités ou les pertes d'exergies des systèmes que l'on peut mettre en oeuvre et dont le design a été défini et retenu au préalable. C'est au contraire la recherche du design optimal de la

machine idéale qui est visé ici, à partir de l'analyse suivante dont les premières applications ont fait l'objet de publications très récentes : pompes à chaleur (4), machine à froid à simple et double effet (5).

Les travaux de Brodyanski et al (6), Le Goff et al (7,8) ont conduit à définir l'exergie E_{ex}^{tr} comme celle qui ne fait que transiter à travers un système sans transformation, impliquant de substituer au rendement classique η_{ex} de Grassmann (9) :

$$\eta_{ex} = \frac{E_{ex}''}{E_{ex}'} = 1 - \frac{D_{ex}}{E_{ex}'} \quad (1)$$

le rendement exergetique intrinsèque η_{in} défini en soustrayant à l'entrée et à la sortie cette exergie E_{ex}^{tr} :

$$\eta_{in} = \frac{E_{ex}'' - E_{ex}^{tr}}{E_{ex}' - E_{ex}^{tr}} = 1 - \frac{D_{ex}}{E_{ex}' - E_{ex}^{tr}} \quad (2)$$

La productivité exergetique η_y (yield) définie comme le rapport de l'exergie utile produite E_{exu}'' et de l'exergie entrante :

$$\eta_y = \frac{E_{exu}''}{E_{ex}'} \quad (3)$$

se distingue de l'effectivité exergetique η_{eff} (effectiveness) définie comme le rapport de l'exergie utile produite et de l'exergie nette entrante, c'est à dire de l'exergie entrante soustraite de l'exergie en transit :

$$\eta_{eff} = \frac{E_{exu}''}{E_{ex}' - E_{ex}^{tr}} \quad (4)$$

L'exergie ($E'_{ex} - E^{tr}_{ex}$) est celle qui participe réellement à une conversion énergétique dans tout procédé ; il est donc logique de faire précéder toute analyse d'un procédé réel incluant des irréversibilités, par l'analyse du procédé idéal (10,11). Dans une telle analyse de procédé idéal, on désignera l'exergie transitant à travers un tel procédé par l'exergie non utilisée E'_{exnu} , la distinguant clairement de toute exergie de même nature extraite du système réel (4). Aussi, comme le montre la Figure 1, l'exergie ($E'_{ex} - E'_{exnu}$) est l'exergie qui va être transformée (ou convertie dans le cas général) dans le sous-procédé réel II, l'exergie non utilisée étant éliminée au niveau du sous-procédé idéal I.

L'exergie sortante du sous procédé II, soit $E'_{ex} - E'_{exnu} - D_{ex}$, est à diviser en deux parties : l'exergie E''_{exu} recherchée par l'utilisateur et pour laquelle le procédé a été mis en œuvre, et l'exergie convertie ou transformée rejetée. En réalité, cette dernière est une exergie produite en excès E''_{ex} d'une part, ou inexploitée E''_{exin} d'autre part, car elle est bien issue du sous procédé réel II.

Cette approche initiée par Sorin et al (9) permet de distinguer :

- le rendement de conversion (ou de transformation suivant le cas):

$$x_e = \frac{E'_{ex} - E'_{exnu}}{E'_{ex}} = 1 - \frac{E'_{exnu}}{E'_{ex}} \quad (5)$$

définissant la qualité du sous procédé idéal I. Il est clair que x_e doit tendre vers 1 : aussi l'analyse du procédé idéal, les choix de ses composants idéaux, doivent tendre vers cette maximisation de x_e ;

- la sélectivité :

$$e_w = \frac{E''_{exe} + E''_{exin}}{E'_{ex}} \quad (6)$$

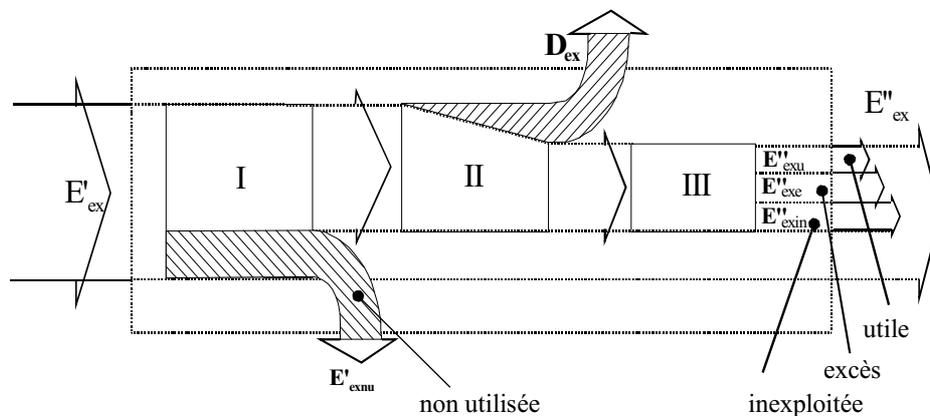


Figure 1. Procédé réel incluant 3 sous procédés :

I : idéal ; II : réel ; III : réel distinguant les utilités des rejets et de l'inexploitation.

Dans le cas de l'adsorption, l'utilisation de la température entropique a été aussi retenue (14). De même on ne retiendra ici que des systèmes fonctionnant à trois niveaux de pression, et mettant en œuvre soit :

définissant la qualité du procédé au niveau des exergies produites non exploitées et en excès. e_w doit tendre vers 0 ;

L'efficacité s'écrit donc :

$$\eta_{\gamma} = x_e - D_{ex} - e_w \quad (7)$$

qu'il s'agit de maximiser. Dans le cas de l'étude de machines idéales :

$$\eta_{yi} = x_e - e_w$$

Cette analyse, naturellement justifiée pour les procédés où les natures des énergies d'entrée, de sortie utiles et rejetées sont différentes, trouve un intérêt particulier dans les procédés où aucune conversion n'est présente, comme les systèmes à sorption gaz-liquide, ou gaz-solide, c'est à dire dans les systèmes où seules des transformations ont lieu.

La mise en œuvre des éléments, sièges de processus endo ou exothermiques de tels procédés, permet de réaliser les finalités décrites initialement. Au cours de cette étude, l'édification de systèmes idéaux de thermotransformation est visée, avec pour but de caractériser, parmi toutes les possibilités de couplages par transfert de gaz entre les éléments endo et exothermiques, de couplages par échanges de chaleur entre ces deux mêmes types d'éléments, ceux dont la mise en œuvre conduit à une utilisation la plus optimale de l'exergie entrante, par

- la minimisation des exergies non utilisées ;
- la minimisation des exergies produites
 - en excès
 - et inexploitées

dont la spécificité sera précisée au cours des exemples traités en 3 et 4.

Au cours de ce travail, l'hypothèse d'une température T_D de désorption unique est retenue, même pour les systèmes divariants comme l'absorption ou l'adsorption; T_D correspond au niveau de température de la fin de l'ab (ad) sorption, donc le niveau le plus élevé. De même, pour la synthèse, c'est le niveau le plus bas qui est retenu. Ces hypothèses sont justifiées par l'utilisation de surfaces d'échanges très importantes (2,12,13).

- deux domaines de concentration d'une solution ou deux solutions, ou encore deux solides adsorbants ou réactifs de nature différente, avec un même type de gaz actif,

- trois domaines de concentration de solution, ou trois solutions, ou encore trois solides actifs : il s'agit de procédés dits à résorption.

Dans de tels systèmes de transformation de l'énergie thermique, deux types de processus physiques, soit endothermiques (a), soit exothermiques (b) sont mis en œuvre :

- a) -l'évaporation E d'un gaz entraînant le pompage d'une quantité de chaleur Q_E ;
 - la désorption D d'une solution riche en gaz, ou d'un solide chargé en gaz (cas de l'adsorption ou de la réaction)
- b) - la condensation C d'un gaz entraînant la production d'une quantité de chaleur Q_C ;
 - la synthèse S d'une solution riche en gaz à partir de la solution pauvre, ou d'un solide chargé en gaz à partir d'un solide déchargé en gaz.

L'affinité d'une solution pauvre ou d'un solide pauvre en gaz entraîne l'évaporation endothermique du gaz et la synthèse exothermique QS avec la relation :

$$Q_S = Q_E + Q_{DS} \quad (8)$$

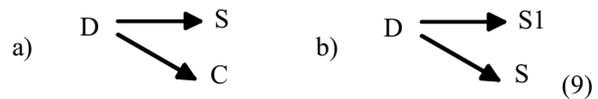
où $Q_{DS} = Q_D - Q_C$, $Q_S = Q_D - r + l$, $Q_E = Q_C - l$; dans le cas de procédés idéaux r représente la chaleur de mélange (cas de solution) ou de réticulation (cas de solides), et l la chaleur latente, comme le décrit Nesselman (15).

La méthodologie retenue consiste à caractériser toutes les possibilités de couplages possibles entre éléments du procédé, à appliquer des règles d'élimination ou de promotions de couplage, enfin à caractériser, sur le cas de la mise en œuvre des systèmes solide-gaz (16): NH_3 vis à vis de $BaCl_2$, $SrCl_2$ et $MnCl_2$, le choix des systèmes les plus performants en terme de remontée de niveau de température d'une source avec une productivité exergetique maximale. On éliminera, au cours de cette première étude, les systèmes impliquant plusieurs niveaux de température de sources ou de température de thermotransformation, et ceux conduisant à la mise en œuvre de procédés fonctionnant à plus de trois niveaux de pression.

2. EDIFICATION DES SYSTEMES DE THERMOTRANSFORMATION

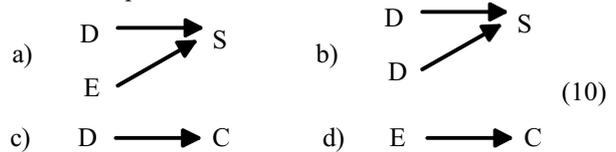
La source thermique qu'il s'agit de revaloriser est mise en contact avec un élément endothermique du procédé, soit le désorbteur D ou l'évaporateur E, soit encore ces deux types d'éléments, alors que l'élément de synthèse S ou le condenseur C (ou encore les deux) sont les sources de l'énergie thermique valorisée.

Le désorbteur D est en liaison avec le condenseur C pour assurer le transport du gaz produit, et avec l'élément de synthèse S auquel il communique la solution ou le solide appauvri. De même, D peut être en liaison avec deux éléments S, l'un pour assurer le transport du gaz produit au cours de cette désorption, l'autre pour l'accueil de la solution ou du solide appauvri. Donc de manière simplifiée, les passages d'énergie quittant un élément endothermique sont :



- c) E → S d) E → C
- assurant le transport de la chaleur latente l ou de la chaleur de mélange ou de réticulation r.

Mais une synthèse S ne peut s'effectuer que si cet élément reçoit simultanément le gaz et la solution (ou le solide) appauvri, pour en effectuer la synthèse. Donc, les passages d'énergie atteignant un élément exothermique S ou C sont :



C'est l'ensemble des combinaisons des passages d'énergie entre éléments endo vers éléments exothermiques qu'il s'agit d'édifier.

Toutefois, deux types d'éléments peuvent être en contact thermique direct, permettant le transfert de chaleur d'un élément exothermique vers un élément endothermique. Donc les transferts de chaleur symbolisés par :

- (a) $C \Rightarrow D$ (b) $S \Rightarrow D$
- (c) $C \Rightarrow E$ (d) $S \Rightarrow E$ (11)

sont à inclure au cours de l'édification des systèmes. C'est ainsi que la combinaison des éléments 9a et 9c permet de respecter la règle 10a :



base des machines à sorption simple effet ; dans le cas de la pompe à chaleur où l'on recherche à amplifier la quantité de chaleur d'une source Q_D à T_D , en pompant de la chaleur Q_E dans un puits infini à $T_E=T_0$, on produit Q_S et Q_C aux niveaux T_S et T_C respectivement avec $T_D \geq T_S$, $T_C > T_E$. Dans le cas de la machine à froid, les mêmes éléments sont interconnectés, mais cette fois Q_S et Q_C sont rejetés dans le puits infini T_0 , permettant, par l'apport de chaleur Q_D à T_D , le pompage de Q_E à $T_E < T_0$.

Dans le cas qui nous intéresse ici, la revalorisation de la chaleur de niveau $T_D=T_E$ jusqu'à T_S est possible par la dégradation de l'énergie latente l du niveau T_D à T_C , en suivant le schéma (12).

D'autres combinaisons d'éléments sont possibles dans lesquels cette fois, les passages directs d'énergie entre éléments sont combinés pour créer des passages d'énergie originaux. De tels passages sont identifiés, en respectant l'ordre suivant au niveau des éléments endothermiques à placer au niveau de la source de chaleur à revaloriser :

- a) 2 passages d'énergie depuis l'entrée, soit E et E'

- b) 3 passages d'énergie depuis l'entrée, soit D et E
- c) 4 passages d'énergie depuis l'entrée, soit D, E et E' ou D et D'
- d) 5 passages d'énergie depuis l'entrée, soit D, D' et E ;

naturellement il faudra placer les éléments suivants à la sortie, sans préjuger des éléments à placer entre les entrées et la sortie de chaleur :

- i) S et C
- ii) S et C et C'
- iii) S et S₁

respectant le premier principe s'exprimant par :

$$Q_D + Q_E = Q_S + Q_C \quad (13)$$

ou

$$Q_D + Q_{D1} = Q_S + Q_{S1} \quad (14)$$

Seuls sont décrits ici les deux cas a) et b), les deux derniers faisant l'objet d'une publication ultérieure.

3. THERMOTRANSFORMATION AVEC LES ELEMENTS E ET E' PLACES A LA SOURCE THERMIQUE A REVALORISER

Les passages d'énergie $E \rightarrow S$ et $E' \rightarrow S_1$ sont les seuls possibles, pouvant engendrer les transferts de chaleur entre les éléments $S \Rightarrow D_1$ et $S_1 \Rightarrow D$. En effet, deux évaporateurs E et E' ne peuvent être mis en contact qu'avec deux éléments de synthèse différents S et S' : le contact de $E \rightarrow C$ n'est pas possible étant donné l'hypothèse du choix d'un seul type de gaz. Afin de respecter les natures des deux énergies latentes d'entrée, seuls les passages de type 9a sont possibles, conduisant à la représentation des passages d'énergie de la Figure 2a, impliquant les passages de l'énergie réticulaire de D vers S₁ et D₁ vers S. L'énergie de mélange ou réticulaire r issue de D₁ est transférée vers S₁. Ainsi donc ce type d'énergie r circulant entre $S_1 \Rightarrow D \rightarrow S \Rightarrow D_1 \rightarrow S_1$ permet le pompage de chaleur du niveau $T_E = T_{E'}$ pour une valorisation de l à T_C, en dégradant toutefois l jusqu'à T_C. Les Figures 2b et 2c illustrent cette rotation de l'énergie de mélange ou réticulaire dans les diagrammes $\theta=f(Q)$ et de

Clausius-Clapeyron. L'exergie E''_{exnu} représentée par la surface (4-5-16-17) n'est pas utilisée : seule l'exergie représentée par la surface (1-3-17-16-5-6) est transformée en exergies représentées par les surfaces (1-2-15-14) et (2-3-8-7) : le passage d'énergie $E \rightarrow C'$ nécessite les passages directs successifs $E \rightarrow S_1$, puis $S_1 \Rightarrow D \rightarrow C$, possible par les passages directs successifs $E' \rightarrow S \Rightarrow D_1 \rightarrow C$. Le diagramme de la Figure 2c représente ces passages d'énergie dans le diagramme classique de Clausius-Clapeyron. Dans cette représentation, on suppose que l'utilisateur souhaite un niveau de température T_{C'} : si le niveau T_{Cu} souhaité était inférieur à T_C, l'exergie $E''_{exc} = Q_C(\theta_C - \theta_{Cu})$ serait produite en excès. Aucune exergie transformée et inexploitée n'est produite.

Ici,

$$x_e = 1 - (Q_C \theta_C / 2Q_E \theta_E) \quad (14a)$$

$$e_w = 0 \quad (14b)$$

$$\text{et } \eta_{yi} = x_e = 1 - (Q_C \theta_C / 2Q_E \theta_E) \quad (14c)$$

Dans le cas retenu où les sels SrCl₂ et MnCl₂ sont mis en œuvre vis à vis de l'ammoniac, pour réaliser la thermotransformation d'une source à 80°C vers le niveau de 170°C, la température de l'environnement étant T₀=10°C, $x_e = \eta_{yi} = 0,91$ car T_C=20°C dans ce cas. La relation :

$$\eta_{yi} = 1 - COA_i \frac{\theta_C}{\theta_E} \quad (15)$$

permet d'identifier le coefficient d'amplification de chaleur idéal COA_i d'un tel système : COA_i=0,5.

Si l'on réduit le niveau de sortie utile à 125°C pour comparer ce système aux suivants, tout en produisant de la chaleur à 170°C, la dégradation de niveau conduit à $e_w=0,18$ et donc à $\eta_{yi}=0,73$.

4. THERMOTRANSFORMATION AVEC LES ELEMENTS D ET E PLACES A LA SOURCE THERMIQUE A REVALORISER

4.1 Cas où D est lié à S et C

La Figure 3a précise les trajets d'énergie de la configuration classique du thermotransformateur. La représentation, dans le diagramme $\theta=f(Q)$ (Figure 3b), des exergies mises en jeu, permet l'identification de

- l'exergie entrante E' : il s'agit de la surface (1-2-3-4) complétée par la surface (1-4-12-11) ;
- l'exergie transférée au condenseur au niveau de θ_C : (5-6-8-2), l'exergie (6-7-3-5) n'étant donc pas utilisée ;
- l'exergie revalorisée du niveau θ_D au niveau θ_S (8-9-10-11) issue d'une part de l'évaporateur, par transfert de la chaleur latente l, d'autre part de la chaleur de mélange ou réticulaire r issue de D.

Donc

$$x_e = 1 - [Q_C \theta_C / (Q_D \theta_D + Q_E \theta_E)] \quad (16a)$$

$$e_w = 0 \quad (16b)$$

et ici

$$\eta_{yi} = x_e \quad (16c)$$

La représentation dans le diagramme de Clausius-Clapeyron est classique (Figure 3c). Dans le cas du couple SrCl₂ - ammoniac, une source à niveau de 80°C ne peut être revalorisée que jusqu'à 125°C, en dévalorisant la chaleur latente l au condenseur à 10°C. $\eta_{yi} = x_e = 1$, avec COA_i = 0,64.

Le transfert de chaleur d'un élément vers un autre suivant (11) conduirait à :

- $C \Rightarrow D_1$: l'élément D₁ est lui-même à relier à deux autres éléments comme S' et C, ou S' et S₁, ce qui nécessite d'autres éléments d'entrée, ce qui est contraire à l'hypothèse de ce cas ;
- $S \Rightarrow D_1$: comme ci-dessus, d'autres éléments

- d'entrée seraient nécessaire, que D_1 soit lié à S_1 et C , ou S' et S_1 ;
- $C \Rightarrow E$: un tel transfert nécessiterait la mise en œuvre de deux types de gaz actif ; un tel transfert 11c est donc exclu ;
 - $S \Rightarrow E'$: le passage d'énergie $9c E' \rightarrow S_1$ implique des entrées nouvelles, non retenues ici ; le passage $9d E' \rightarrow C'$ est à éliminer, comme ci-dessus.

En conclusion, seul le cas représenté Figure 3 est possible. Il faut noter ici que le passage de l'énergie de réticulation r de D vers S permet d'un part la dégradation de la chaleur latente de T_D à T_C , et l'apport de chaleur latente du niveau $T_E = T_D$ au niveau T_S .

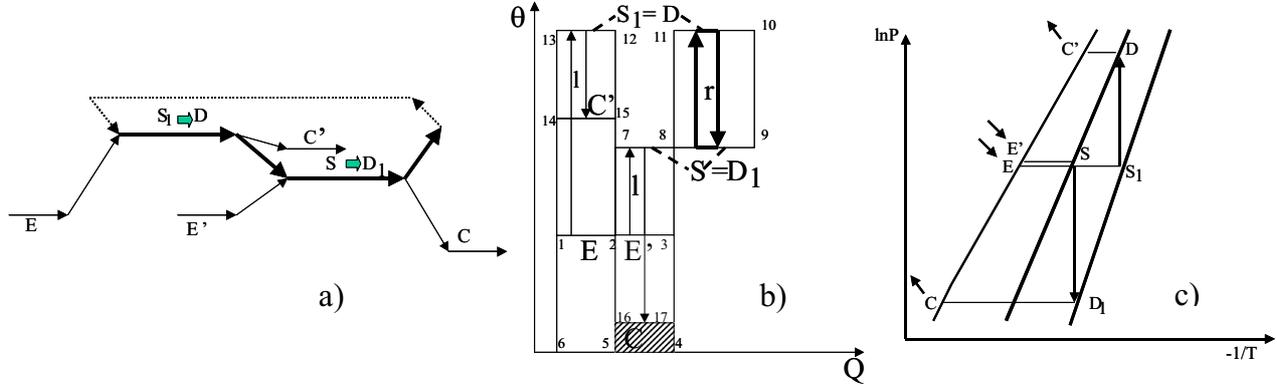


Figure 2 : Représentation des passages d'énergie latente (traits fins) et de mélange ou réticulaire (traits épais) dans un système de thermotransformation basé sur le contact de deux évaporateurs avec la source énergétique (a) ; représentation dans le diagramme $\theta = f(Q)$ d'un tel système (b) et représentation dans le diagramme de Clausius -Clapeyron (c).

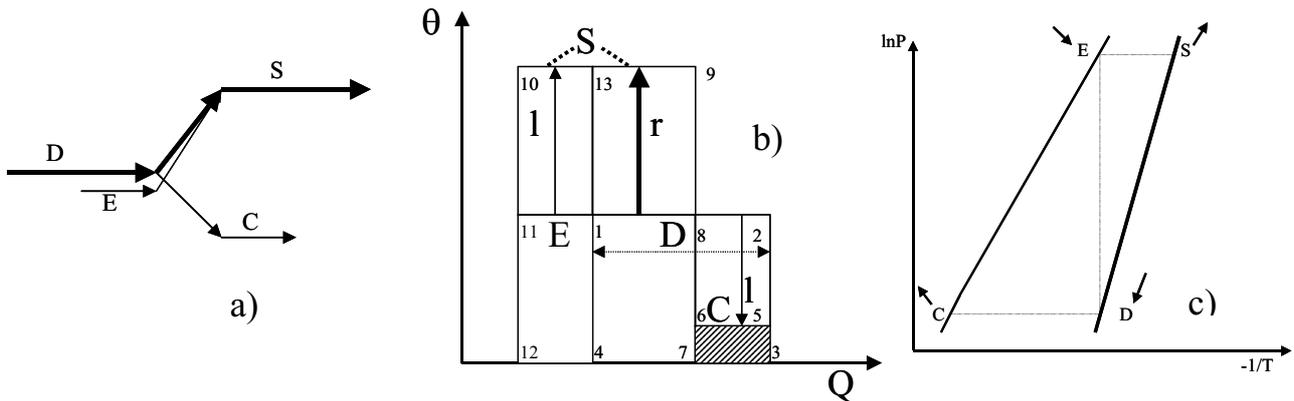


Figure 3 : Représentation des passages d'énergie latente (traits fins) et de mélange ou réticulaire (traits épais) dans un système de thermotransformation basé sur le contact d'un désorbeur et d'un évaporateur avec la source énergétique (a) ; représentation dans le diagramme $\theta = f(Q)$ d'un tel système (b) et représentation dans le diagramme de Clausius -Clapeyron (c). Cas du système simple effet.

4.2 cas où D est lié à S et S_1

A l'entrée, les éléments D et E conduisent aux passages d'énergie où les éléments S et S_1 sont placés à la sortie. Un déficit de liaisons énergétiques apparaît donc. Il peut être résolu en transférant la chaleur exothermique de synthèse S à un élément endothermique D_1 suivant (11b), D_1 reconduisant à la mise en œuvre d'un élément de synthèse et d'un condenseur : cet élément de synthèse doit être S_1 pour respecter les passages d'énergie entre les six éléments, comme cela est représenté Figure 4a.

Un transfert supplémentaire de type $S_1 \Rightarrow D_2$ impliquerait un nouvel équilibre, contraire à l'hypothèse de l'étude, n'autorisant que deux couples

de travail vis à vis d'un gaz (ou trois couples, sans condensation ni évaporation).

Les Figures 4b et 4c illustrent ce procédé de thermotransformation à cascade à double saut thermique, où encore x_e , e_w et η_{yi} sont égaux à ceux de l'expression (16). Dans l'exemple retenu, le relevage de chaleur à partir de la source à 80°C conduit à $x_e=0,97$ et à un niveau de production de chaleur égal à 130°C . L'excès de chaleur produit, si on ne désire qu'un niveau de 125°C , conduit à $e_w=0,03$, soit donc $\eta_{yi}=0,94$, le coefficient COA_i étant de $0,64$.

Il est remarquable de noter que le trajet de l'énergie de mélange ou réticulaire r de $D \rightarrow S \rightarrow D_1 \rightarrow S_1$ permet

cette double remontée de niveau de température de $T_D=T_E$ à T_{S1} .
 Si cette fois E et D_1 sont en contact avec la source de chaleur à revaloriser, le même raisonnement conduit cette fois à la représentation des Figures 5a, b et c. Il faut noter les faibles performances de ce type de

procédé à cascade à simple saut thermique, en terme de niveau de revalorisation, ainsi que les quantités importantes d'exergie inutilisée. En effet, sur l'exemple des couples $BaCl_2 - SrCl_2$ avec NH_3 , $x_c=0,52$, $e_w=0$ et donc $\eta_{vi}=0,52$ avec $COA_i=0,35$.

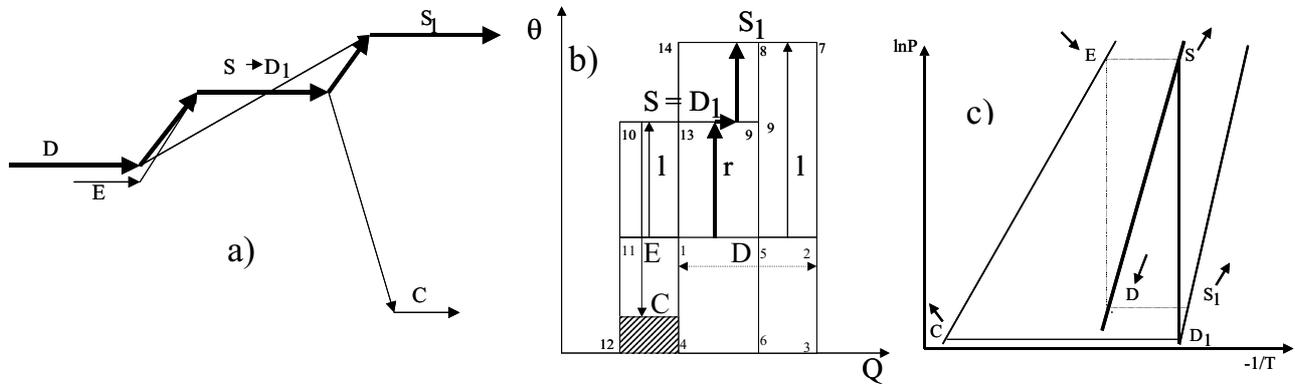


Figure 4 : Représentation des passages d'énergie latente (traits fins) et de mélange ou réticulaire (traits épais) dans un système de thermotransformation basé sur le contact d'un désorbeur et d'un évaporateur avec la source énergétique (a) ; représentation dans le diagramme $\theta = f(Q)$ d'un tel système (b) et représentation dans le diagramme de Clausius-Clapeyron (c). Cas du système à cascade à double saut thermique.

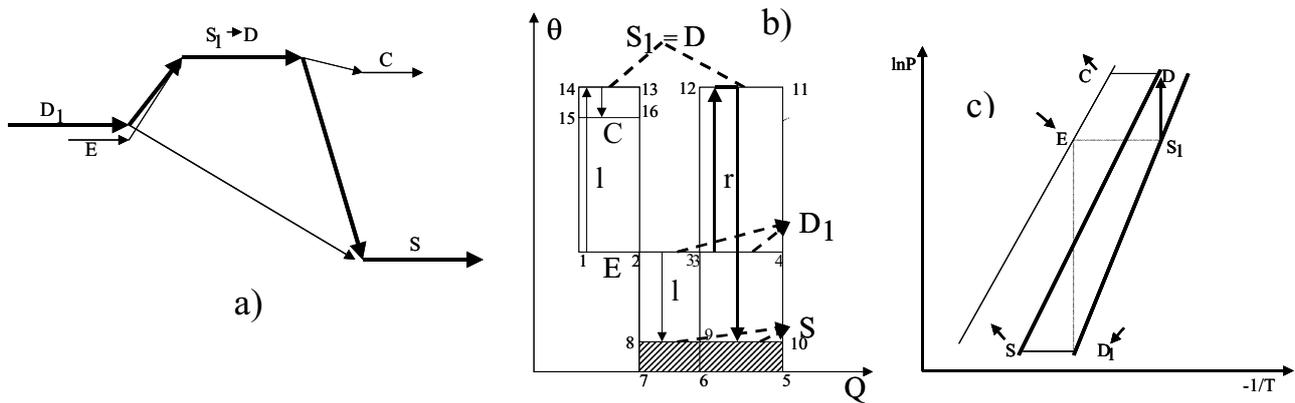


Figure 5 : Représentation des passages d'énergie latente (traits fins) et de mélange ou réticulaire (traits épais) dans un système de thermotransformation basé sur le contact d'un désorbeur et d'un évaporateur avec la source énergétique (a) ; représentation dans le diagramme $\theta = f(Q)$ d'un tel système (b) et représentation dans le diagramme de Clausius-Clapeyron (c). Cas du système à cascade à simple saut thermique.

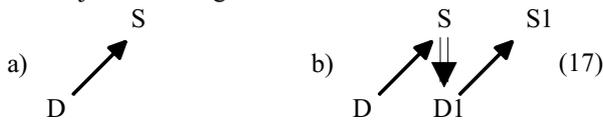
5. DISCUSSION ET CONCLUSION

L'analyse des thermotransformateurs basée sur celle du caractère de l'exergie entrante fait apparaître qu'une partie de l'exergie est dégradée jusqu'à un niveau de température qui, s'il n'est pas égal à la température de l'environnement T_0 , est à l'origine d'un facteur de conversion (ou de transformation) x_c inférieur à 1 ; l'autre partie de l'exergie entrante voit son potentiel revalorisé : il ne s'agit pas d'exergie de transit car ce flux participe réellement à la transformation énergétique dans le procédé.

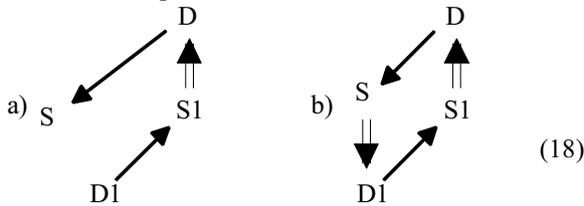
Les quatre systèmes édifiés à partir des règles émises illustrent les trajets différents des énergies latentes et des énergies de mélange ou réticulaires mises en jeu, permettant la revalorisation du niveau de température d'une source de chaleur. La source à revaloriser doit nécessairement être reliée à deux éléments endothermiques dont les passages d'énergie conduisent, d'une part à un élément exothermique délivrant son énergie thermique à plus haut niveau, d'autre part à plus bas niveau thermique, pour respecter le second principe. Les éléments E et D endothermiques doivent trouver des éléments exothermiques S et C. La mise en œuvre de chaleur de mélange ou réticulaire r

accompagne donc nécessairement les chaleurs latentes apparaissant dans l'élément D en contact avec la source.

Les trajets des énergies r sont :



illustrés respectivement sur les cas des Figures 3 et 4, S et S_1 étant respectivement les niveaux revalorisés ;



illustrés respectivement sur les cas des Figures 5 et 2, D délivrant la chaleur latente l à un condenseur au niveau de température de revalorisation.

Pour l'ensemble de ces cas, la chaleur latente l issue de la source est d'une part dévalorisée, d'autre part revalorisée ; dans les cas 17 (a et b) et 18a, les éléments D sont en contact avec la source à revaloriser : en particulier dans les cas 17, la chaleur réticulaire ou de mélange r est aussi revalorisée, tandis que dans le cas 18a, elle est dévalorisée. Cette distinction induit une différenciation dans le choix des procédés : les cas 17 privilégient la remontée d'une forte quantité de chaleur à un niveau moyen, alors que le cas 18a permet de relever une quantité plus faible mais à un niveau très élevé.

Le cas 18b est intéressant dans la mesure où l'élément D n'est pas en contact avec la source thermique : la chaleur de mélange ou réticulaire r ne fait que circuler entre les éléments D et S, pour permettre la remontée de l tout en ne dévalorisant qu'une même quantité de chaleur.

Les exemples retenus pour revaloriser un niveau de chaleur de 70°C à 125°C illustrent la méthodologie et le choix optimal du système idéal à mettre en œuvre de manière pratique. L'approche de la thermodynamique en temps ou taille finie permet ensuite de caractériser pour une puissance donnée, le COA du procédé endoréversible retenu.

REFERENCES

- [1] P. Bittrich et D. Hebecker. Classification and evaluation of heat transformation processes. Rev. Gén. Thermique, t38, n°6, pp 467-474 (1999)
- [2] G. Alefeld et R. Radermacher. Heat conversion systems. CRC Press, Boca Raton (1994)
- [3] P. Le Goff, A. Lour, T Cachot et J.M. Hornut. Quelle température de référence choisir dans le calcul de l'exergie. Entropie (à paraître)
- [4] B. Spinner, M. Sorin et D. Stitou. Internal flow analysis within a single effect heat pump. I.J. Refrigeration, 24(2), pp. 185-191 (2001)
- [5] M. Sorin, B. Spinner et D. Stitou. Chem. Eng. Sci. (sous presse)

- [6] M.V. Brodyanski, M. Sorin et P. Le Goff. The efficiency of industrial processes. Exergy analysis and optimization. Elsevier (1994)
- [7] P. Le Goff, T. Cachot, A. Lassale et M.S. Rahbar. Comment évaluer la performance d'un convertisseur d'exergie : rendement, ou efficacité, ou effectivité ? Proc. JETCIV, Nancy (France), pp 112-120, (sept. 1995)
- [8] P. Le Goff, R. Daoudi et A. Laouir. Exergy analysis of sorption heat pumps: a graphical method. Proc. Ab-Sorption 96, Montréal (Canada), pp 97-106 (1996)
- [9] P. Grassmann. Zur allgemeinen Definition des Wirkungsgrades. Chem. Eng. Technik, 14, pp 77-80 (1950)
- [10] D. Stitou, B. Spinner et M. Sorin. A new advanced exergy analysis of sorption systems: characterisation of transiting exergy and exergy yield concept. Proc. ISHPC, Munich (Germany), pp 401-407 (24-26 march 1999)
- [11] M. Sorin, B. Spinner et D. Stitou. Synthesis of single effect solid-gas thermochemical refrigerators. Trans. I. Chem. E., vol 78, part A, pp 795-802 (2000)
- [12] P. Kumar et S. Devotta. Study of an absorption refrigeration system for simultaneous cooling and heating, ASHRAE Trans., 96(2), n°3415, pp. 291-298 (1990)
- [13] R.M. Tozer et R. W. James, Thermodynamics of absorption refrigeration : ideal cycles. Proc. Int. Abs. Heat Pump Conf., AES - vol. 31, ASME, pp. 393-400 (1993)
- [14] F. Meunier, P. Neveu et J. Castaing-Lavignotte. Equivalent Carnot cycles for sorption refrigeration. IRJ, 21(6), pp. 472-489 (1998)
- [15] K.Nesselman. Z. ges. Kälteindustrie 11, pp.213-216 (1935)
- [16] V. Goetz, F. Elie et B. Spinner, The structure and performance of single effect solid-gas chemical heat pumps, Heat Recovery Systems and CHP, 13(1), pp.79-96 (1993).

NOMENCLATURE

COA	coefficient opérationnel d'amplification de chaleur
D	désorption
E	évaporation
C	condensation
S	synthèse
D_{ex}	perte d'exergie (J)
E_{ex}	exergie (J)
Q	quantité de chaleur (J)
T	température (K)
'	entrée
«	sortie
θ	facteur de Carnot
η_{ex}	rendement exergétique
η_{in}	rendement intrinsèque
η_y	efficacité exergétique
η_{eff}	effectivité exergétique
e	excès

in inexploitée
i idéal
tr transit

u utile
nu non utilisée

INTERNAL ENERGY FLOW ANALYSIS IN SORPTION THERMO-TRANSFORMATION

The energy conversion process integration analysis is usually based upon

- the adequacy between energy sources and sinks on the one hand, and energy demand and reject on the other.
- The irreversibility characterization

In the special case of thermal energy transformation processes where only heat energy form is considered at the demand and reject levels, such an analysis requires deep consideration based upon an exergy approach of the input energy flows, the internal process transformation, and the output flows.

One can distinguish:

- The process untapped exergy : its level identification relative to an ideal process allows to define an exergy conversion efficiency x_e which has to be optimized for a specified system design construction .
- The excess produced exergy: it is the energy quality requested, but which is produced in excess by the system.
- The produced exergy which remains untapped : as an example, the operation temperature level is of no interest in the process .

These last two exergy situations allow the determination of a selectivity parameter (e_w) (the lack of the process quality) that have to be minimized according to the system design. The total system efficiency yield η_y is obtained from such an analysis:

$$\eta_y = x_e - D_{ex} - e_w$$

where D_{ex} is the lost exergy in the process.

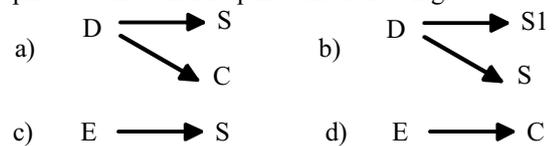
In the case of a sorption system (gas-liquid absorption, gas-solid absorption or reaction) the optimal design is quantified by means of the 3 parameters defined above. (systems which imply numerous transformations are considered here).

Such systems are based upon the interconnection through the various endothermic or exothermic gaseous phases involved in the processes depending on whether

they produce or consume gases. They are endothermic for solids decomposition, desorption from gas rich solutions **D**; liquefied gas evaporation **E**. They are exothermic in synthesis of solid- rich gases, in absorption of gases in solutions **S** and in gas condensation **C**. All these phases can be interconnected through thermal transfer between the exothermic and endothermic one.

Interconnections rules are formulated taking into account the latent heat transfer of the gas as well as the mixture heat generated in solutions, or reticulation for the solid cases **r**.

Accordingly, the various energy transfer from one phase to the other requires the followings:



while the possible heat transfers process which can be identified are:

$$C \Rightarrow D \quad S \Rightarrow D \quad C \Rightarrow E \quad S \Rightarrow E$$

From this analysis, four systems can be identified for which the heat-transformation of the heat input can be achieved:

- 2 E
- E and D

with extraction in :

- 2C (C high T and C low T)
- S and C (S high T, C low T)
- C and S (C high T, S low T)

The diagrams of $\theta = f(Q)$ allows the input and output exergy flow analysis of the various systems, as well as the identification of the untapped or excess exergy.

For the solid-gas cases using ammoniacates, the yield evaluation characterises the most efficient process to be designed and constructed.