

Contribution à l'Elaboration d'une Approche Rationnelle de Procédés de Transfert de Chaleur au Sein d'un Réseau d'Echangeurs de Chaleur

L. Rahal et M. Bezzina

Laboratoire de Génie et Informatique Chimique, Institut de Chimie Industrielle, Université de Blida, B.P. 270, Blida, Algérie

Résumé - Notre communication se veut comme une contribution à l'élaboration d'une approche rationnelle de procédés de transfert de chaleur au sein d'un réseau d'échangeurs de chaleur. Il s'agit de la conception optimale d'un réseau donné tenant compte d'un certain nombre de paramètres tels que la structure du réseau, le nombre d'échangeurs et les utilités requises. Nous utiliserons à cet effet une approche simple et rigoureuse permettant une récupération maximale d'énergie et en minimisant l'apport extérieur d'énergie, en favorisant au maximum le couplage des courants chauds et froids existants sans pour autant compromettre la minimisation de l'aire d'aire d'échange globale du réseau. Les résultats de cette optimisation sont validés par un cas industriel pratique.

Mots clés: Simulation - Réseau - Echangeurs de chaleur - Pinch - Synthèse optimale.

1. INTRODUCTION

Les procédés industriels sont des systèmes complexes constitués de multitudes d'opérations unitaires généralement très diversifiées (réacteurs, séparateurs, échangeurs de chaleurs, pompes, compresseurs, ...) et interconnectées. Leur comportement dépend de celui de chacune de leurs unités et des interactions qui existent entre ses unités. A cause de la complexité des phénomènes mis en jeu, l'analyse de ce comportement pour les besoins de conception ou de conduite de procédés présente beaucoup de difficultés.

Les recherches visant le développement de techniques de synthèse optimale de procédés, n'ont commencé réellement que depuis une vingtaine d'années (Linnhoff et Flower, 1978 ; Jezowski et Hahn, 1986 ; Wolf, 1986) sur la synthèse optimale (H-T) de manière à ce que le point où l'écart entre les deux courbes précitées est le plus faible correspond à l'écart minimal de température, consenti pour la réalisation du transfert de chaleur entre les courants du procédé des réseaux d'échangeurs de chaleur dans les procédés. La méthode du point de pincement Pinch Technology, développé grâce à ces travaux, a fait l'objet de beaucoup d'applications réussies dans différents secteurs industriels.

Cette méthode dans le développement continue toujours grâce à ces travaux antérieurs (Linnhoff et Flower, 1978 ; Rahal et Bezzina, 1997) se base sur une représentation graphique des courants du procédé dans un diagramme enthalpie (H) - température (T). Tous les courants chauds nécessitant un refroidissement sont représentés par une seule courbe, appelée courbe globale des courants chauds et tous les courants froids, nécessitant un réchauffage, sont représentés par une courbe globale des courants froids. Ces deux courbes sont positionnées sur le diagramme.

Le point en question est le point de pincement et sa détermination permet de fixer les utilités minimales, chaudes et froides, nécessaire pour satisfaire les besoins énergétiques du procédé.

La comparaison de ses quantités d'utilités minimales à celles consommées réellement par le procédé en question, permet de dégager les possibilités d'économie d'énergie qu'on veut réaliser moyennant un surplus d'investissement. Ce surplus peut être calculé à l'aide de la méthode de design du pinch. La faisabilité de la réalisation du projet d'amélioration dépend du temps de remboursement fixé par l'investisseur.

Nous nous proposons dans cet article de présenter un algorithme de synthèse optimale de réseaux d'échangeurs de chaleur basé sur la technologie du point de pincement, sur une représentation graphique des courbes globales des courants chauds et froids et apportant une modification, par rapport à des méthodes antérieures (Linnhoff et Flower, 1978) au niveau de la formulation des quantités d'utilités chaudes et froides nécessaires au procédé. Cet algorithme a été testé sur des exemples de littératures et a donné de très bons résultats.

2. PROCEDURE D'EVALUATION DE LA QUANTITE DE CHALEUR RECUPERABLE AU SEIN D'UN RESEAU D'ECHANGEURS DE CHALEUR

Dans un réseau qui effectue les réchauffements et les refroidissements demandés, on distingue deux sous réseaux (Christodoulous et al., 1986 ; Grossman et Sargent, 1978).

Le réseau interne où les réchauffements et les refroidissements se font les uns par les autres.

Le réseau externe où les réchauffements s'effectuent en faisant appel aux utilités chaudes et les refroidissements restant s'effectuent en faisant appel aux utilités froides.

Le réseau interne peut être caractérisé par deux paramètres fondamentaux :

- Le débit de chaleur Q qui y est échangé
- La différence de température minimale ΔT de part et d'autre de sa surface d'échange.

Ainsi on peut écrire les relations suivantes

$$Q_F^U = Q_C - Q \quad Q_C^U = Q_F - Q \quad (1)$$

Q_F^U = débit de chaleur pris aux courants chauds par les utilités froides.

Q_C^U = débit de chaleur fourni aux courants froids par les utilités chaudes.

Q_F = débit de chaleur total nécessaire pour tous les réchauffements demandés.

Q_C = débit de chaleur total nécessaire pour tous les refroidissements demandés.

Le paramètre ΔT constitue, compte tenu de sa relation avec l'aire d'échange du réseau interne, une représentation commode du coût de l'installation.

L'intérêt de choisir Q et ΔT l'un et l'autre aussi grand que possible conduit à se préoccuper de la valeur maximale, $Q_R(e)$ que peut prendre Q sous la contrainte $\Delta T \geq e$.

$Q_R(e)$ est l'énergie récupérable sous la contrainte $\Delta T \geq e$.

Divers auteurs ont proposé des procédures d'évaluation graphique ou algorithmiques de $Q_R(e)$, dans des conditions plus ou moins restrictives.

Nous montrons, dans ce travail, qu'il est possible d'exprimer $Q_R(e)$ sous la forme d'une expression mathématique simple et générale (Guiglion et al., 1989 ; Rahal et Bezzina, 1997) :

$$Q_R(e) = \text{Min}[q_F(T_F) + q_C(T_C)] \quad \text{pour } T_C - T_F = e \quad (2)$$

$q_F(T_F)$ = débit de chaleur à fournir aux courants à réchauffer dont les températures sont inférieure à T_F

$q_C(T_C)$ = débit de chaleur à prendre aux courants à refroidir dont les températures sont supérieures à T_F

On désigne par $M(q_F, q_C, e)$, la borne inférieure des valeurs que peut prendre la somme $q_F(T_F) + q_C(T_C)$ quand T_F et T_C varient sous la contrainte $T_C - T_F = e$.

Ainsi pour généraliser à toute valeur de e , même négative, on peut écrire :

$$Q_R(e) = M(q_F, q_C, e) \quad (3)$$

2.1 Evaluation graphique de la quantité de chaleur optimale récupérable au sein d'un réseau d'échangeurs de chaleur

Soit un réseau d'échangeurs de chaleurs composé de N_C courants chauds et N_F courants froids la quantification de $Q_R(e)$ se fait graphiquement en traçant sur un même graphe la courbe froide (représentée par la fonction $t_F = f(h_F)$) et la courbe chaude (représentée par la fonction $t_C = f(h_C)$).

On suppose que les chaleurs spécifiques des fluides sont constantes au sein d'un courant donné et les changements de phases exclus. Dans ces conditions, les variations de $h_F(T_F)$ entre T_F^i et T_F^{j+1} et les variations de $h_C(T_C)$ entre T_C^i et T_C^{i+1} sont linéaires où : T_C^i = températures extrêmes, rangées par ordre croissant, des N_C courants chauds (dans ce cas, i varie de 1 à $2N_C$); et T_F^j = températures extrêmes, rangées par ordre croissant, des N_F courants froids (dans ce cas, j varie de 1 à de $2N_F$).

Le maximum de couplage se fait dans le cas où $e = 0$ ce qui correspond à un maximum d'énergie récupérable, c'est-à-dire qu'il s'agit de faire refroidir les courants chauds autant que possible par les courants froids plutôt que par les utilités froides.

Or il y a deux raisons qui peuvent empêcher que tout les courants chauds soient refroidis par les courants froids. La première est que l'on ait $Q_F < Q_C$, ce qui veut dire qu'une quantité de chaleur au moins égale à $(Q_C - Q_F)$ soit prise aux courants chauds par les utilités froides. La seconde est l'existence d'une zone de couplages interdits, où pour un débit de chaleur donné, le point sur la courbe chaude se trouve à une température inférieure à celle du point sur la courbe froide.

On désigne par Q_Z la quantité de chaleur dont il faut déplacer la courbe froide dans le sens positif de l'axe des Q pour faire disparaître la zone de couplages interdits (si cette zone n'existe pas, alors $Q_Z = 0$).

Dans tous les cas, c'est la plus grande des deux valeurs ($Q_C - Q_F$) et Q_Z qui est déterminante, elle est égale à Q_F^U et permet de calculer Q_R et Q_C^U .

Si l'on ait dans un cas où ($Q_C - Q_F$) est déterminante, alors :

$$Q_F^U = Q_C - Q_F \quad (4)$$

$$Q_R = Q_C - Q_F^U = Q_F \quad (5)$$

$$Q_C^U = Q_F - Q_R \quad (6)$$

$$Q_F^U = Q_Z \quad (7)$$

$$Q_R = Q_C - Q_F^U = Q_C - Q_Z \quad (8)$$

$$Q_C^U = Q_F - Q_R = (Q_F - Q_C) + Q_Z \quad (9)$$

Nous posons :

$$H_C = \text{Max} \left[h_C(t'_C) - h_F(t'_C - e) \right] \quad \text{avec } i = 1, \dots, 2N_F \quad (10)$$

$$H_C = \text{Max} \left[h_C(t'_C) - h_F(t'_C - e) \right] \quad \text{avec } i = 1, \dots, 2N_C \quad (11)$$

Considérons le cas où la valeur de Q_Z est déterminante, alors $Q_F^U = Q_Z$ et graphiquement, on constate que $Q_Z = \text{Max}(H_F, H_C)$.

Si la valeur $Q_C - Q_F$ est déterminante, alors $Q_F^U = Q_C - Q_F$, et graphiquement, on constate que $Q_C - Q_F = \text{Max}(H_F, H_C)$.

Ainsi et dans tous les cas, nous avons :

$$Q_R(e) = Q_C - Q_F^U = Q_C - \text{Max}(H_F, H_C) \quad (12)$$

$$Q_R(e) = Q_C - \text{Max} \left[\text{Max} \left[h_C(t_F^i + e) - h_F(t_F^i) \right], \text{Max} \left[h_C(t_C^i) - h_F(t_C^i - e) \right] \right] \quad (13)$$

En supposant que les fonctions $h_F(T_F)$ et $h_C(T_C)$ sont linéaires entre deux températures consécutives, alors il vient :

$$Q_R(e) = Q_C - \text{Max} \left[h_C(T_C) - h_F(T_F) \right] \quad \text{avec } T_C - T_F = e \quad (14)$$

$$Q_R(e) = Q_C + \text{Min} \left[h_F(T_F) - h_C(T_C) \right] \quad \text{avec } T_C - T_F = e \quad (15)$$

Or $h_F(T_F) = q_F(T_F)$ et sachant que les changements de phases sont exclus, on a $h_C(T_C) = Q_C - q_C(T_C)$, alors on déduit que :

$$Q_R(e) = \text{Min} \left[q_F(t_F) + q_C(t_C) \right] \quad \text{avec } T_C - T_F = e \quad (16)$$

2.2 Application

Nous avons appliqué cette méthodologie à un réseau représentant une partie du dispositif énergétique d'une unité industrielle, c'est un réseau composé de 10 courants chauds et 10 courants froids.

Nous avons représenté sur la figure 1 la variation de la température en fonction de la chaleur pour les courants chauds et les courants froids (courbe chaude et courbe froide) et où $\Delta T_{\min} = e = 94 \text{ F} = 34 \text{ °C}$. Nous remarquons que jusqu'à $e = 94 \text{ F}$, Q_Z est toujours nulle ce qui veut dire que $Q_C - Q_F$ est déterminante ($Q_C - Q_F = 3.36 \cdot 10^6 \text{ BTU/hr}$).

A partir de $e = 94 \text{ F}$, Q_Z commence à augmenter jusqu'à ce qu'on ait : $Q_Z = Q_C - Q_F = 3.36 \cdot 10^6 \text{ BTU/h}$ pour $e = 263 \text{ F} = 128 \text{ C}$. Au-delà de cette température Q_Z devient déterminante.

La figure 2 est une représentation de la figure 1 avec déplacement de la courbe froide d'une valeur de $Q_Z = 3.36 \cdot 10^6 \text{ BTU/hr}$ dans le sens positif de l'axe des chaleurs et où $e = 263 \text{ F}$.

Dans tous les cas, c'est la plus grande des deux valeurs (Q_Z , $Q_C - Q_F$) qui est déterminante.

Si $e = 94 \text{ F}$, $Q_Z = 0$

$$Q_C - Q_F = Q_F^U = 3.36 \cdot 10^6 \text{ BTU/h}$$

$$Q_R = Q_F = Q_C - Q_F^U = 14.82 \cdot 10^6 - 3.36 \cdot 10^6 = 11.46 \cdot 10^6 \text{ BTU/h}$$

$$Q_F^U = Q_F - Q_R = 0$$

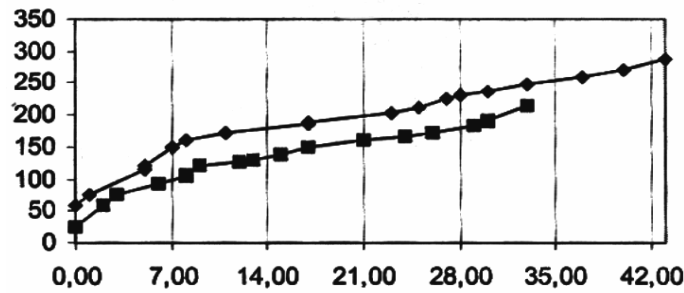


Fig. 1: Courbe chaude et courbe froide (non déplacée)

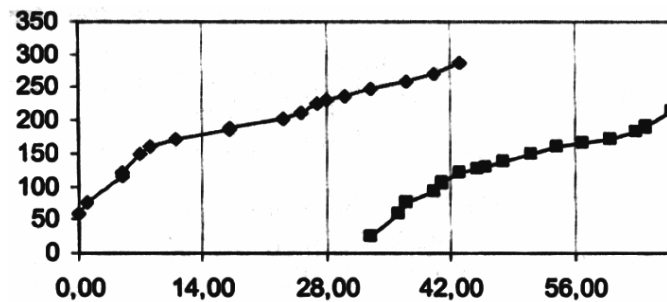


Fig. 2: Courbe chaude et courbe froide (déplacée de $Q_C - Q_F$)

Si e est supérieur ou égal à 263 F, Q_Z devient déterminante, il vient :

$$Q_F^U > 3.36 \cdot 10^6 \text{ BTU/h}$$

$$Q_R = Q_C - Q_F^U = 11.46 \cdot 10^6 \text{ BTU/h}$$

$$Q_C^U > 0$$

Ainsi on peut dire que la valeur de $e = 34 \text{ }^\circ\text{C}$ est intéressante pour récupérer le maximum d'énergie en faisant le maximum de couplage sans pour autant contribuer à l'augmentation de l'aire d'échange. Ce constat nous a ramené à faire des propositions à l'unité industrielle en question pour lui permettre de faire un gain énergétique d'environ 10 % de l'énergie dépensée actuellement et avec les échangeurs déjà existants.

3. CONCLUSION

Nous nous proposons par cette étude d'apporter notre contribution à l'amélioration des études faites par Linnhoff et ses collaborateurs sur les possibilités de récupération d'énergie, en particulier par la rigueur et la généralité des démonstrations apportées. Cette contribution porte sur l'expression analytique de l'énergie récupérable pour une demande fixée de réchauffements et de refroidissements en adoptant une valeur donnée de l'écart minimal de température de part et d'autre de la surface d'échange et au-dessous duquel on s'interdit de faire les couplages.

REFERENCES

- [1] L. Christodoulos, A. Floudas et I.E. Grossman, 'Synthesis of Flexible Heat Exchanger Network for Multiperiod Operation', *Comp. Chem. Eng.*, Vol. 10, N°2, pp. 153-168, 1986
- [2] I.E. Grossman et R.W. Sargent, 'Optimum Design of Heat Exchanger Network', *Comp. Chem. Eng.*, Vol. 2, pp. 1-7, 1978.
- [3] C. Guiglion, S. Domenech et L. Pibouleau, 'Récupération Optimale de l'Energie dans les Réseaux d'Echangeurs de Chaleur', *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 32, N°2, pp. 243-250, 1989.
- [4] J. Jezowski and E. Hann, 'Heat Exchanger Network Synthesis by Debth-First Method, a Cas Study', *Chem. Eng. Science*, Vol. 41, N°12, pp. 2289-2997, 1986.
- [5] B. Linnhoff and J. Flower, 'Synthesis of Heat Exchanger Network', *A.I.Ch.J.*, Vol. 24, N°4, pp. 633-654, 1978.
- [6] S.A. Papoulias and I.E. Grossman, 'A Optimisation Approach in Process Synthesis, Part I, II and III', *Comp. Chem. Eng.*, Vol. 7, N°6, pp. 695-721, 1983.
- [7] L. Rahal et M. Bezzina, 'Influence de l'Ecart Minimal de Températures sur la Récupération d'Energie au sein d'un Réseau d'Echangeurs de Chaleur', Third International Thermal Energy and Environment Congress (ITEC'97), Marrakech, Maroc, 9-12 juin 1997.
- [8] A. Wolff, 'Synthesis of Energy Recovery Net by Heuristic-Combinatorial Algorithm', *Hungarian Journal of the Industrial Chemistry*, Vol. 14, pp. 105-125, 1986.