

Intégration Energétique de Procédés industriels

Ing. F. LECOQ
Ir. C. CHARLIER
GRAMME – Liège

Ce travail propose des techniques de minimisation de l'énergie afin de concevoir un réseau optimal d'échangeurs, en tenant compte aussi bien de leurs coûts, que de celui de l'énergie. Pour ce faire, le travail d'intégration énergétique est scindé en deux grandes étapes, qui sont le Targeting et la Synthèse. Il s'agit également un travail de synergie entre des règles de bonnes pratiques et des équations mathématiques.

Mots-clés : Energie, Targeting, Synthèse énergétique, MER, CMER, Intégration énergétique, Procédé, Optimisation, Utilitaires, Pincement.

This work proposes us techniques of minimization of the energy in order to design an optimal network of heat exchangers taking into account their costs as well as those of energy. To reach that purpose, the work of energy integration is divided in 2 steps, we mean the Targeting and the Synthesis. It also implies a work of synergy between the good practice rules and the mathematical equations.

Keywords : Energy, Targeting, Energy Synthesis, MER, CMER, Heat Integration, Process, Optimization, Utility, Pinch point.

1. Généralités

Dans l'environnement socio-économique que nous vivons actuellement, l'utilisation rationnelle de l'énergie dans les procédés industriels est un facteur prépondérant dans la compétitivité entre les entreprises. Les montées du prix du pétrole et de l'énergie en général, nous imposent de minimiser les coûts énergétiques. Bien entendu, il faut également tenir compte du coût de l'investissement à réaliser pour rationaliser l'utilisation de l'énergie dans les systèmes d'utilitaires énergétiques des sites industriels ou, selon le cas, tenir compte de l'investissement à réaliser pour optimiser la récupération de la chaleur dans les procédés par le réseau d'échangeurs de chaleur.

L'impact environnemental est également lié à la consommation énergétique et de ce fait, elle doit être minimum. En effet, pour obtenir de la chaleur, les industries consomment du pétrole, ce qui génère du CO₂, gaz reconnu pour son effet de serre, ainsi que du SO₂ entraînant des pluies acides. De même, le fonctionnement d'un procédé industriel requiert de l'énergie à haut potentiel qui entraîne ensuite l'évacuation d'une énergie à bas potentiel vers l'environnement, ce qui nécessitera l'emploi de l'eau de refroidissement en grande quantité.

Deux grandes écoles existent depuis le début de la recherche en intégration énergétique, elles proposent l'utilisation de méthodes différentes pour résoudre le problème. D'une part, il existe les méthodes basées sur l'analyse thermodynamique et le savoir-faire des ingénieurs : c'est la technologie du « Pinch » proposée par Linnhoff et alia (1982). D'autre part, il existe les méthodes mathématiques basées sur l'utilisation des techniques de la recherche opérationnelle, par optimisation linéaire et non linéaire, avec ou sans nombres entiers.

Résoudre un problème d'intégration énergétique ne se fait pas en une seule étape. Tout d'abord, il faut réaliser des calculs thermodynamiques, et valider les mesures permettant d'obtenir les données nécessaires à la recherche du Minimum d'Énergie Requise (en abrégé MER). Par la suite, il faut concevoir le réseau d'échangeurs du procédé ainsi que son système d'utilitaires afin d'en évaluer le coût total.

Le développement d'un outil informatique permet d'obtenir la définition des objectifs, intitulée *targeting*, ainsi que la conception du réseau énergétique

des procédés industriels, intitulée synthèse, afin de calculer l'objectif énergétique du système étudié.

2. Targeting

2.1 Introduction

Comme précisé précédemment, l'intégration énergétique se déroule en deux étapes :

- La première ou targeting consiste à définir le besoin minimum d'énergie (c'est-à-dire le MER).
- La seconde ou synthèse tente de trouver le coût minimum du réseau d'échangeurs en respectant le MER défini lors de la première étape.

Le targeting permet donc de définir le MER pour plusieurs configurations de réseaux d'échangeurs. Cela permet également d'identifier les flux stratégiques du procédé et de proposer une modification de celui-ci pour augmenter le rendement énergétique. De plus dans cette étape, les utilitaires pourront être intégrés. La méthode utilisée pour résoudre le targeting est basée sur le second principe de la thermodynamique.

2.2 Notions thermodynamiques

Le comportement thermodynamique d'un système est caractérisé par la relation entre l'enthalpie et la température représentée par le diagramme H-T (figure 2.1). La chaleur qui peut être échangée (charge thermique) est donnée par la relation classique idéale (1):

$$Q = C_p (T_o - T_i) \quad (1)$$

où

- C_p (kW/K) = chaleur spécifique totale définie par le produit de la chaleur spécifique (c_p en kJ/kmol/K) et du débit total du flux (q en kmol/sec).
- T_o = Température finale du flux (en K).
- T_i = Température initiale du flux.

La figure 1 représente la relation dans le diagramme H-T dans le cas particulier d'un flux froid.

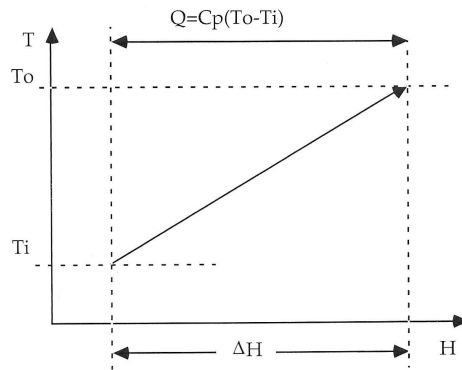


Figure 1 : Diagramme H-T pour un flux froid

Il est à noter que seule la variation de chaleur nous intéresse, le graphe peut être localisé ou déplacé à n'importe quel point de l'axe de l'enthalpie.

Remarques Importantes

- Un flux froid est un flux qui sera chauffé, cela peut être aussi bien le cas de l'eau froide que de la vapeur, l'enthalpie d'entrée est seulement plus petite que celle de sortie. (fig. 1)
- Un flux chaud est un flux qui sera refroidi, on peut citer l'exemple des fumées, de la condensation de la vapeur, etc. L'enthalpie à l'entrée est bien évidemment plus grande que celle de la sortie.
- Les termes « chaud » et le « froid » ont un sens relatif et n'ont donc pas de lien univoque avec le niveau de température.

2.3 Courbes composées

Soient les températures de 2 flux chauds (fig. 2) variant de T_4 à T_1 . Pour chaque intervalle de température DT ($T_2 - T_1$, etc.), nous pouvons calculer la charge de la chaleur cumulée qui est la somme des contributions de chaque flux dans l'intervalle DT . La charge de chaleur de chaque DT est le total disponible pour échanger avec les flux froids. L'intégration de tous les intervalles de températures nous donne une courbe appelée la **courbe composée chaude**. Quand les C_p sont constants dans l'intervalle DT , la contribution de chaque intervalle de température i équivaut à :

$$Dh_i = (T_i - T_{i-1}) (\sum Cp_{ij}) \quad (2)$$

Cp_{ji} étant l'apport d'énergie du flux chaud j dans l'intervalle de température i.

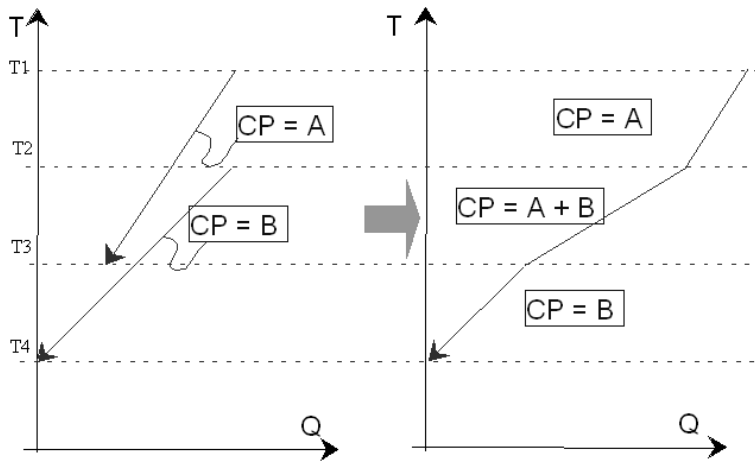


Figure 2 : Construction de la courbe composée chaude

Nous avons respectivement :

$$\begin{aligned} DH1 &= CPA * (T1 - T2) \\ DH2 &= (CPA + CPB) * (T2 - T3) \\ DH3 &= CPB * (T3 - T4) \end{aligned}$$

La même procédure est utilisée pour calculer la **courbe composée froide** en utilisant bien entendu les flux froids.

Pour qu'un échange soit réalisable, la courbe composée froide doit nécessairement être en dessous de la courbe composée chaude en n'importe quel point. La différence de température entre les deux courbes doit être plus grande ou égale à un écart minimum de température choisi appelé DT_{min} comme cela est montré sur la figure 3.

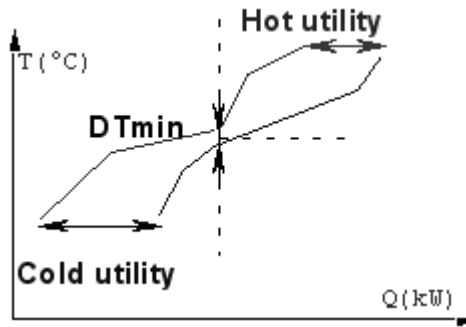


Figure 3 : Courbes composées froide et chaude

La figure précédente fait également apparaître un excès d'énergie, indiqué par **Cold utility**, qu'il faudra évacuer, ainsi qu'un besoin d'énergie, indiqué par **Hot utility**, qu'il faudra assurer. Pour le DT_{min} choisi, il s'agit aussi du Minimum d'Énergie Requise (MER) dont a besoin le procédé pour que le flux froid atteigne sa température la plus haute.

La chaleur excédentaire du flux chaud correspond à l'utilitaire froid. L'énergie retirée permet au flux chaud d'atteindre sa température la plus froide.

2.4 Méthode de résolution pour la recherche du MER

Si la courbe froide est décalée de $+ T_{min}/2$ et la courbe chaude de $- DT_{min}/2$, il y a un contact entre les courbes composées chaudes et froides (fig. 4). Les flux chauds sont en fait considérés plus froids qu'ils ne le sont en réalité. De même, les flux froids sont considérés comme plus chauds.

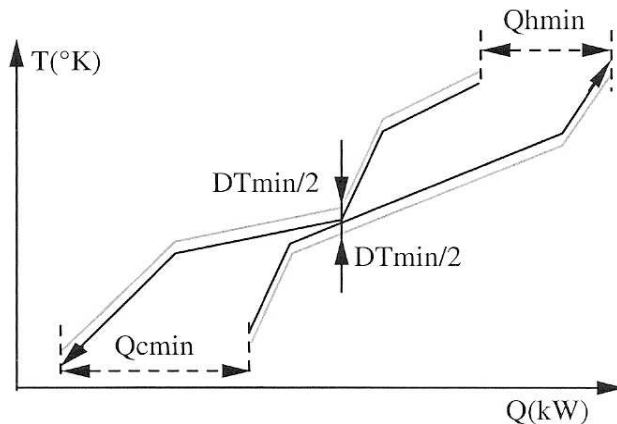


Figure 4 : Courbes composées avec les températures corrigées

Ainsi la première étape pour calculer le MER est de créer la liste des températures corrigées.

La seconde est de calculer la cascade thermique pour chaque intervalle de température. Ceci est illustré par la figure 5.

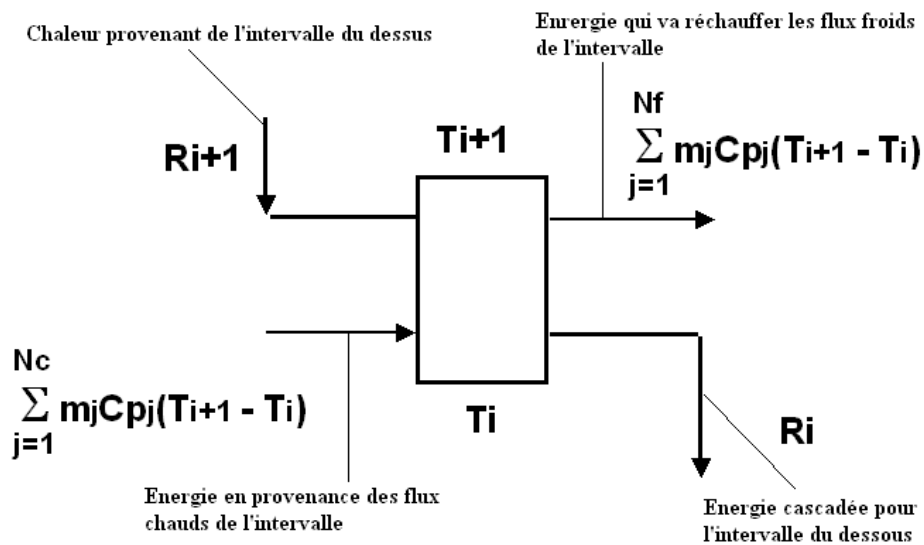


Figure 5 : Bilan d'énergie par intervalle de température

Dans le schéma ci-dessus, dans un intervalle de température $[T_{i+1}, T_i]$ donné, l'énergie transmise à l'intervalle inférieur, est égale à l'énergie provenant de l'intervalle supérieur augmentée de l'énergie provenant des flux chauds dans l'intervalle, diminuée de l'énergie utilisée pour réchauffer les flux froids dans ce même intervalle. L'équation de ce bilan s'écrit donc sous la forme :

$$R_{k+1} + \sum_{j=1}^{n_c} m_j C p_j (T_{i+1} - T_i) - \sum_{j=1}^{n_f} m C p (T_{i+1} - T_i) = R_k$$

k appartient à $[1, NI]$ où NI est le nombre d'intervalles de température. Les R_k sont les seules variables pour ce bilan énergétique. Pour tous les intervalles les $R_k \geq 0$. Nous avons également :

$$\begin{aligned} R_{NI+1} &= Q_H \min \\ R_1 &= Q_C \min ; \end{aligned}$$

n_c : Nombre de flux chauds appartenant à l'intervalle i ;
 n_f : Nombre de flux froids appartenant à l'intervalle i .

2.5 Exemple graphique de bilans de chaleurs dans les intervalles de températures

Pour illustrer la méthode de résolution graphique, nous résolvons le cas suivant dont les données sont à la figure 6. Soient 4 flux échangeant leurs chaleurs.

N°	Tin(°C)	Tout(°C)	Cp(kW/°C)	Q(kW)
1	20	135	2	230
2	170	60	3	-330
3	80	140	4	240
4	150	30	1.5	-180

Figure 6 : Tableau des données

NB : Cp (kW/K) = chaleur spécifique totale définie par le produit de la chaleur spécifique (cp en kJ/kmol/K) et du débit total du flux (en kmol/sec). Bien entendu, par Kelvin ou par degré Celsius est équivalent.

- Choix du DTmin = 10°C => DTmin/2 = 5°C. Nous obtenons donc, par le bilan de chaleur dans chaque intervalle de température, les résultats suivants :

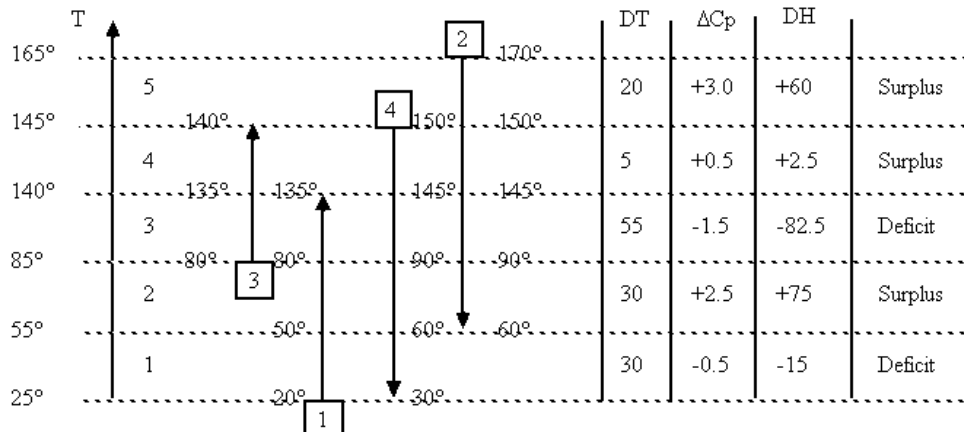


Figure 7 : Détails du calcul

Graphiquement, dessinons la cascade thermique en utilisant les R_k (voir ci-avant) et en tenant compte des températures corrigées. La figure 8 nous montre le résultat de la combinaison entre les courbes composées chaudes et froides qu'on appelle **grande courbe composée**.

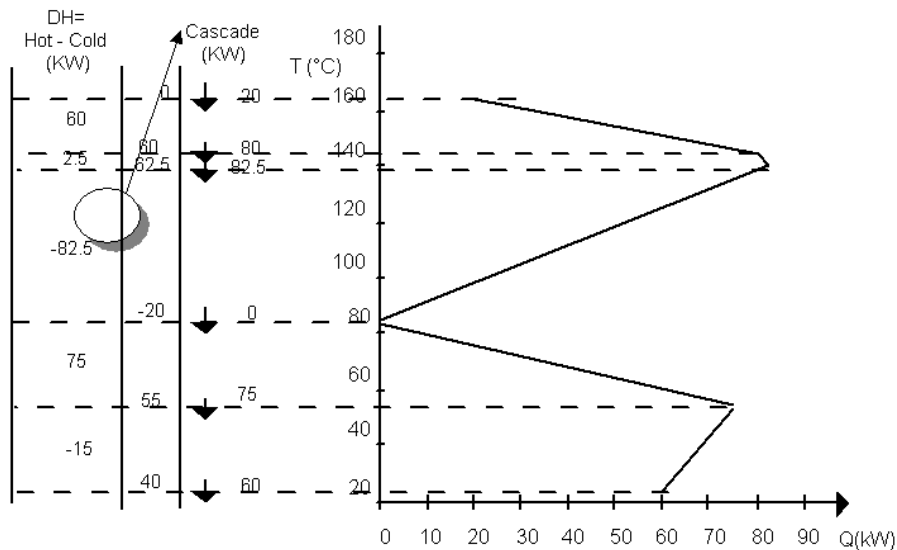


Figure 8 : Cascade thermique et la « Grande courbe composée »

Grâce à cette courbe, reprise à la figure précédente, nous pouvons déterminer les besoins minima en énergie qui sont (les valeurs sont lues en abscisse) de 20kW pour l'Utilitaire chaud et de 60kW pour l'Utilitaire froid : 60kW

2.6 Définition du Pinch

Le point où la différence de température est égale au DT_{min} choisi est appelé le point de pincement ou « Pinch point ». Sa position localise l'endroit où l'échange est le plus difficile. Le Pinch point identifie l'endroit potentiel d'étranglement du procédé. L'analyse des flux concernés avec le Pinch point sera d'une grande aide pour augmenter l'efficacité dans l'échange d'énergie du procédé. Le Pinch point se situe donc à l'intersection de la courbe avec l'axe des températures c'est-à-dire dans notre exemple à 85°C. Ce qui signifie 80°C pour les flux froids et 90°C pour les flux chauds.

Le Pinch divise le procédé en 2 sous-systèmes indépendants : une source de chaleur sous le Pinch et au-dessus de celui-ci, un déficit d'énergie, ceci étant bien identifiée avec la « grande courbe composée ». Celle-ci nous sera d'une aide très précieuse dans la suite du travail pour choisir les meilleurs utilitaires.

2.7 Principes à respecter pour le MER

Principe “The more in - The more out”

Le bilan de chaleur montre que chaque charge supplémentaire de chaleur introduite à l'utilitaire chaud conduit inmanquablement à la même surcharge d'utilitaire froid.

Pas d'utilitaire chaud sous le Pinch

Nous avons montré que le procédé est divisé d'une part en une source chaude et d'autre part en un déficit d'énergie. La source chaude n'a donc pas besoin d'utilitaire chaud. En effet si cet utilitaire était envisagé, cela reviendrait donc aussi à refroidir son équivalent par un utilitaire froid. Cela reviendrait à déplacer la Grande courbe composée vers la droite.

Pas d'utilitaire froid au-dessus du Pinch

De manière similaire au propos précédent l'utilisation d'utilitaire froid dans la partie déficitaire en énergie reviendrait à devoir chauffer directement cet utilitaire avec un utilitaire chaud.

Pas d'échange à travers le Pinch

Dans le cadre du MER et comme les deux sous-systèmes sont indépendants, un flux chaud au-dessus du Pinch ne peut pas transférer sa chaleur aux flux froids situés sous le Pinch. Dans ce cas, il n'y aurait pas assez de charge de chaleur restante au flux chaud pour satisfaire le besoin des autres flux froids au-dessus du Pinch. En conséquence, l'utilitaire chaud devrait augmenter ce qui n'est pas économiquement intéressant. Cette situation est similaire pour les flux froids sous le Pinch.

3. Synthèse énergétique

3.1 Objectif de la synthèse énergétique

Dans la phase Targeting, l'objectif énergétique a été calculé en supposant que n'importe quel flux peut échanger de la chaleur avec n'importe quel autre flux pour autant que cela soit thermodynamiquement faisable tout en respectant le DTmin. Cependant ce n'est pas toujours aisé pratiquement parlant.

Maintenant, la synthèse énergétique va s'atteler à déterminer la structure "optimale" du réseau d'échangeurs et du réseau d'utilitaires en prenant pour hypothèse initiale que l'objectif énergétique de la phase targeting est optimal.

La détermination de la structure du réseau d'échangeurs est la première étape de la synthèse. Cela consiste à trouver une structure faisable qui sera optimisée dans les prochaines étapes. La détermination de cette structure est obtenue en fixant le MER y compris les utilitaires.

3.2 Règles de faisabilité

Règle du nombre de flux sous et au-dessus du Pinch point

La première règle concerne le nombre de flux qui arrivent au Pinch point. Comme l'utilitaire froid ne peut pas être utilisé au-dessus du Pinch, ce nombre de flux froids au-dessus du Pinch doit être plus grand ou égal au nombre de flux chauds (fig. 9). De la même façon, sous le Pinch point, ce nombre de flux chauds doit être plus grand ou égal au nombre de flux froids.

- Au-dessus du Pinch, $N_c \leq N_f$ (N_c étant le nombre de flux chauds au-dessus du Pinch point; N_f étant le nombre de flux froids au-dessus du Pinch point). Tous deux doivent conduire au Pinch point.
- Sous le Pinch, $N_f \leq N_c$ (N_c étant le nombre de flux chauds sous le Pinch point; N_f étant le nombre de flux froids sous le Pinch point). De même, Tous deux doivent arriver au Pinch point.

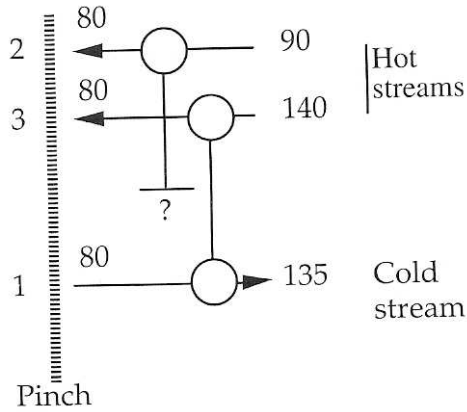


Figure 9 : La règle du nombre de flux au-dessus du Pinch
 $N_f (= 1) \leq N_c (= 2)$

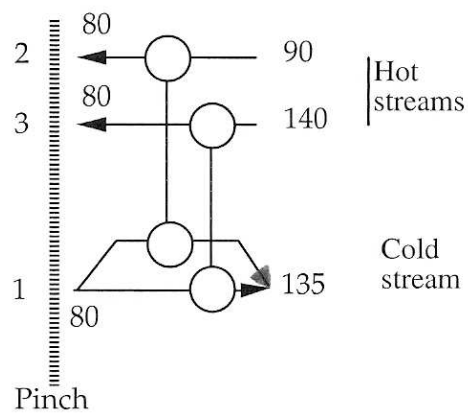


Figure 10 : Le flux froid a été 'splitté' pour respecter la règle du nombre de flux
 $N_f (= 2) \leq N_c (= 2)$

Il n'y a pas assez de flux froids pour amener le flux 2 au Pinch. Pour satisfaire la règle, le flux froid sera séparé en deux sous-flux comme montré à la figure 10. Le facteur de séparation est égal au ratio des charges thermiques.

Règle des cp

La seconde règle de faisabilité pour les échangeurs 'traversant' le Pinch point est la règle des Cp. Au-dessus du Pinch point, le DTmin est vérifié. Le Cp du flux froid doit être plus grand que celui du flux chaud ; sinon le DTmin ne serait pas situé à cet endroit. C'est le contraire pour les échangeurs arrivant au Pinch sous celui-ci. (fig. 11)

Au-dessus du pinch point :

$$\sum_{j=1}^{n_f} Cp_f - \sum_{j=1}^{n_c} Cp_c \geq 0$$

En-dessous du pinch point :

$$\sum_{j=1}^{n_c} Cp_c - \sum_{j=1}^{n_f} Cp_f \geq 0$$

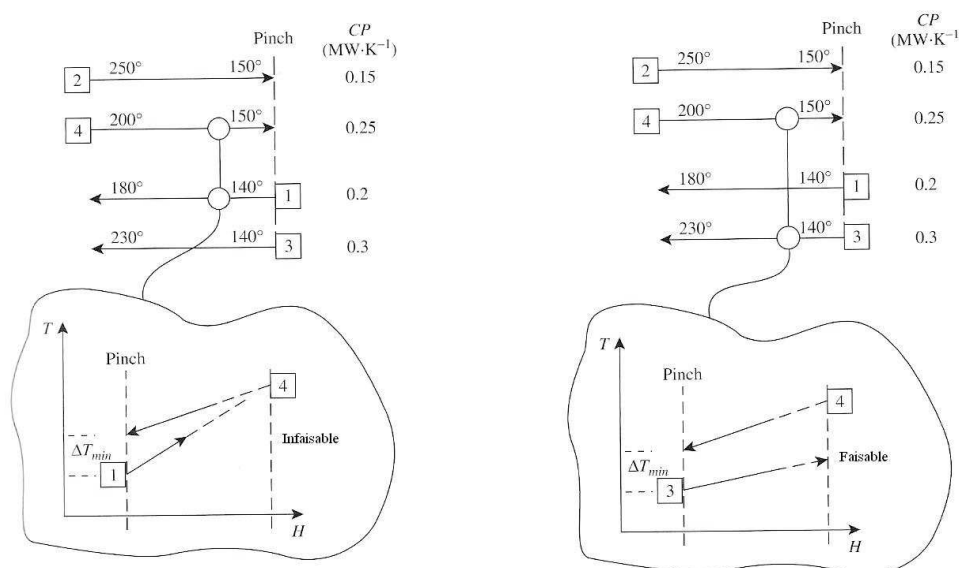


Figure 11 : Applications de la règle des Cp

Autres règles de bonne pratique

Afin d'accéder au réseau optimal, il convient aussi d'envisager les règles élémentaires brièvement décrites ci-après. Elles doivent bien entendu être envisagée dans le programme d'analyse basé sur OPL studio.

- Essayer de connecter ensemble le flux froid et le flux chaud qui ont les plus hauts Cp. Cela ralentit l'échange (gradient de température moins élevé) mais cela permet une utilisation plus rationnelle de l'énergie disponible.
- Règle du Tick-off: essayer de satisfaire la charge d'un des 2 flux intervenant dans une connexion en commençant par celui qui a le Cp le plus élevé (règle des Cp). L'exemple de la figure suivante (fig. 12) montre l'application de cette règle, Le premier flux utilise 17.5 kW, ensuite les 6.5 sont à leur tour redistribués, etc., jusqu'à la mise en place de l'utilitaire (froid dans ce cas et de 10 MW).

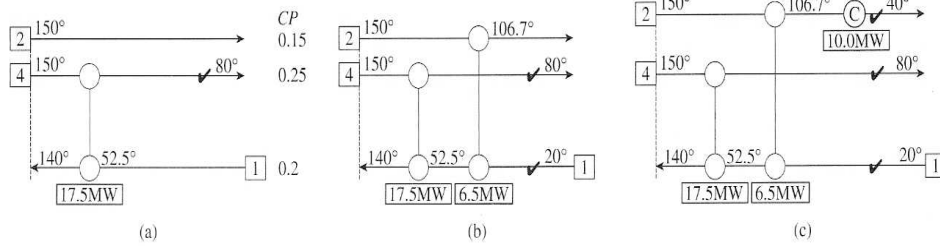


Figure 12 : Règle du Tick-off

Exemple d'un réseau d'échangeurs

La figure suivante représente un petit réseau réel d'échangeurs. Il va servir d'exemple à la méthode mise en place dans ce travail afin de l'optimiser.

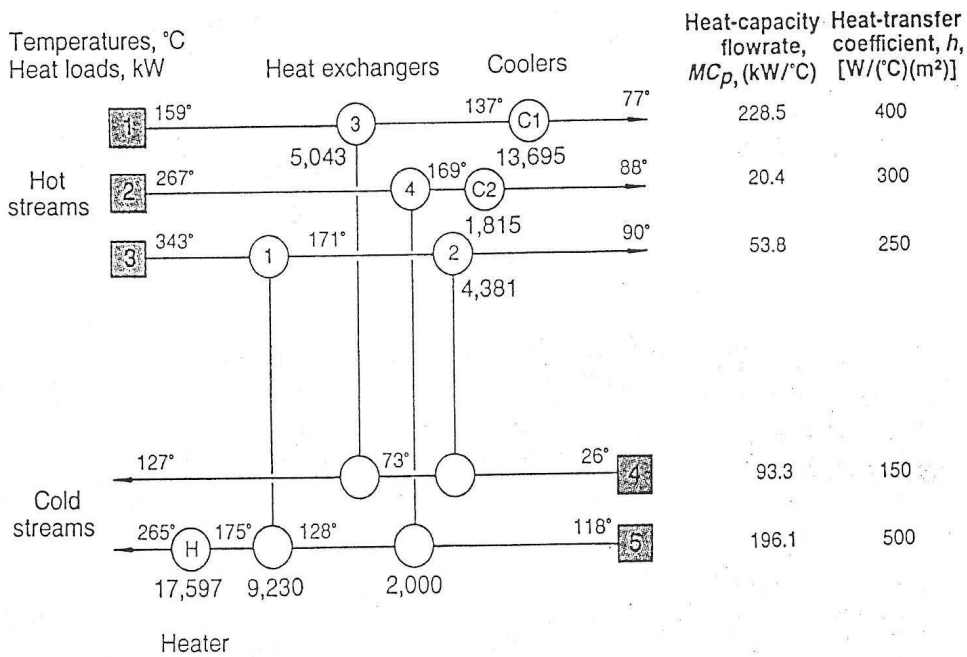


Figure 13 : Réseau d'échangeurs

4. Programmation

La dernière partie de ce travail est entièrement dédiée à la programmation de tous les concepts vus précédemment. La résolution d'un problème par la méthode LP et MILP définie ci-après ne peut se faire manuellement, c'est pourquoi l'utilisation d'un programme adapté (OPL Studio) pour la résolution de ce genre de problème fut choisi. Ce logiciel permet de résoudre les problèmes LP (la fonction objectif et les contraintes développées sont sous forme linéaires), MILP (idem que LP mais avec au moins un entier comme variable).

4.1 Algorithme pour la recherche du MER

Nous présentons ci-après les grandes lignes de l'algorithme réalisé.

- 1) Mettre en ordre la liste des températures corrigées
 - 2) Bilan de chaleur de chaque intervalle de température (DH_i) où $DH_i = \text{flux chaud} - \text{flux froid}$: ce qui donne un surplus ou un déficit en énergie
 - 3) Prendre $R_{n+1} = 0$;
 - 4) Résoudre la cascade de chaleur
 - 5) Identifier la plus petite valeur de R_i
 - 6) Si $R_i \leq 0$, prendre $R_{n+1} = -R_i$
 - 7) Résoudre une nouvelle fois la cascade de chaleur
 - 8) $R_{n+1} = \text{MER}$ (Besoin minimum d'énergie)
 - R_{n+1} : utilitaire chaud
 - R_1 : utilitaire froid
 - $R_i = 0$: Pinch point
- La fonction objectif : minimise H_1 (l'énergie de l'utilitaire chaud)
 - Les contraintes : pour tous les i compris entre 1 et Nombre d'intervalles de température NI :
- $$H[i] \geq 0$$
- $$dh[i] + H[i] = H[i+1] : \text{Cascade thermique}$$

Le programme permet d'obtenir les solutions suivantes :

- Les connexions entre les flux : y_{ij}
- Les charges qui s'échangent d'un flux à l'autre : Q_{ij}
- Les charges qui s'échangent d'un flux à l'autre dans chaque intervalle de température : Q_{ijk}

Ceci permet d'en tirer :

- les courbes composées
- la grande courbe composée
- le réseau d'échangeurs
- le prix de ce réseau
- l'intégration des utilitaires selon leurs coûts

La critique des résultats obtenus peut ainsi commencer et grâce au programme de synthèse énergétique, l'ingénieur peut réaliser divers tests en effectuant différents choix, comme celui du DT_{min} (montré ci-après dans les figures). Il peut même aussi envisager des choix de connexions interdites (à cause de raisons pratiques).

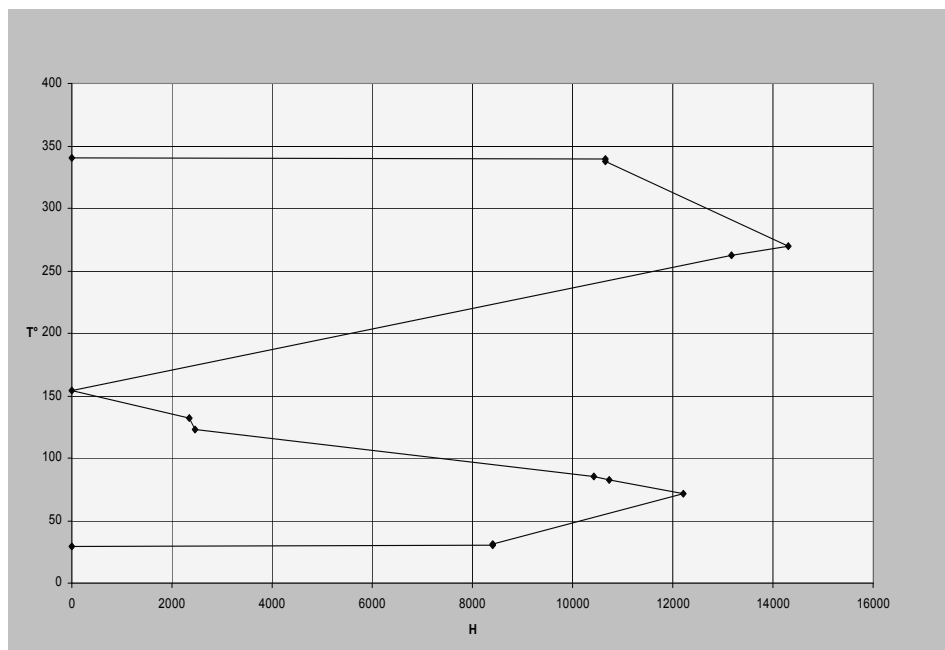


Figure 14 : Choix du $DT_{min} = 10^{\circ}C$

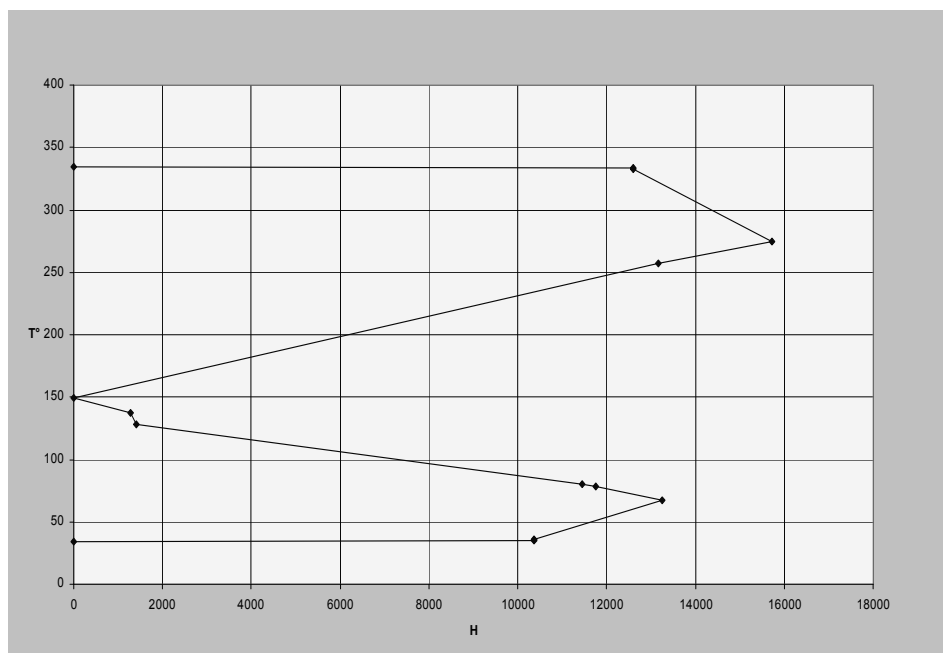


Figure 15 : Choix du $DT_{min} = 20^{\circ}C$

Le constat est clair, le MER change bien suivant le DT_{min} choisi. Le coût en fonction du DT_{min} sera aussi un facteur important à prendre en compte (confer CMER).

Ci-après (fig. 16), un des résultats donné par le programme pour l'exemple présenté figure 13 (les valeurs supérieures à 1000 sont les charges échangées en kW, les autres sont des C_p ou des températures, s'il n'y a pas de décimales). Il y a plusieurs configurations possibles grâce à la méthode de l'integer cut (voir paragraphe suivant).

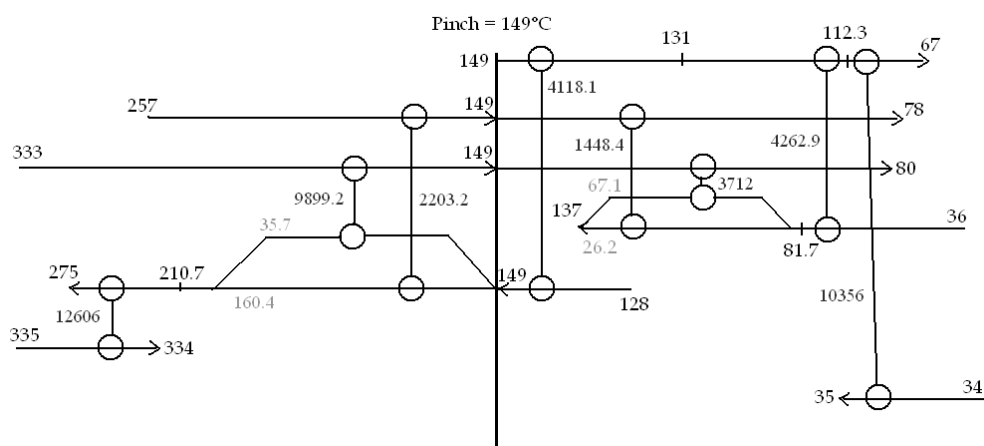


Figure 16 : Résultat du Réseau d'échangeurs

4.2 L'Integer cut

Une méthode permet d'obtenir le même résultat, c'est-à-dire le même nombre d'échangeurs mais avec des configurations différentes, c'est l'Integer cut. Son expression mathématique est exprimée ci-après. Si le programme ne trouvait pas de configurations différentes respectant le nombre d'échangeurs donnés, il prendrait le nombre de connexions + 1.

Contraintes supplémentaires au problème de synthèse :

Somme des i, j de $((2*y_{2ij}-1)*y_{ij}) \leq$ somme des i, j des $(y_{2ij}-1)$ et

Somme des i, j de $((2*y_{3ij}-1)*y_{ij}) \leq$ somme des i, j des $(y_{3ij}-1)$ etc.

y_{2ij} et y_{3ij} étant les solutions déjà données par le ou les programme(s) précédent(s).

5. CMER

5.1 Définition

Lorsqu'on désire optimiser les utilitaires, le concept de MER ne peut plus être appliqué. En effet, il importe non seulement de fournir l'énergie au système mais également de réaliser cette opération au moindre coût. Ce concept sera remplacé par un nouveau concept, celui du Coût Minimum d'Énergie Requise (CMER). Dès lors, la fonction objectif n'est plus le

minimum de R_{NI+1} (l'énergie introduite dans le système) mais c'est de trouver l'ensemble des flux utilitaires qui satisfont les besoins à coût minimum. En programmation, cela se traduit comme suit :

- La fonction objectif tend à minimiser le coût, soit :

$$\text{Coût} = \sum_{j=1}^{n_u} C1_j y_j + C2_j f_j$$

où n_u est le nombre d'utilitaires.

- Les contraintes :
 - Equations de bilan de chaleur :

$$R_{j+1} \sum_{j=1}^{n_c} f_j q_{ji} - \sum_{j=1}^{n_f} f_j q_{ji} - R_i = 0$$

- Second principe : $R_i \geq 0$

Le choix des utilitaires se fait grâce à cette contrainte :

$$f_{\min j} y_j \leq f_j \leq f_{\max j} y_j$$

Si $y_j = 0 \Rightarrow f_j = 0$ Utility not choosen

Si $y_j = 1 \Rightarrow f_{\min j} \leq f_j \leq f_{\max j}$ Utility choosen

5.2 Coût en fonction du DTmin

L'installation coûte moins cher quand le DTmin augmente car l'aire de l'échangeur est plus petite. En effet, le capital matériel diminue.

Il faut plus d'utilitaires lorsque le DTmin augmente ce qui va engendrer un coût en énergie qui augmente. Le coût de l'énergie augmente.

5.3 Compromis entre énergie et capital

L'évaluation du coût total de l'installation devient la fonction objectif à atteindre, elle est la conjugaison des objectifs variant avec le Dtmin.

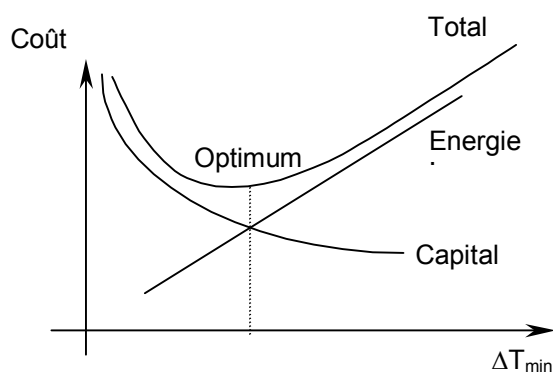


Figure 17 : Graphique des coûts par rapport aux ΔT_{min}

6. Conclusion

Comme nous l'avons montré, le travail de l'intégration énergétique est scindé en deux grandes étapes, que l'on a désigné par le Targeting et la Synthèse.

Le calcul du Minimum d'Énergie Requise (MER) basé sur les courbes composées des flux chauds et des flux froids représente la première partie de ce Targeting. Vient ensuite l'intégration des utilitaires dans le réseau d'échangeurs qui sont les besoins énergétiques du procédé.

Le choix des utilitaires par le concept du coût minimum d'énergie requise (CMER) entraîne une économie pécuniaire. L'établissement de ce concept repose avant tout sur la maîtrise d'un outil informatique, OPL Studio qui est basé sur les techniques d'optimisation linéaire. L'objectif est de satisfaire les besoins énergétiques au moindre coût. La cascade thermique y est représentée par un ensemble de contraintes de bilan d'énergie.

Le problème de la synthèse énergétique d'un procédé industriel est une tâche complexe pour l'ingénieur. En fait il n'existe pas qu'une seule solution au problème et c'est à l'ingénieur de s'orienter vers le choix le plus judicieux.

Le choix d'un échangeur de chaleur optimal ne représente pas seulement le coût le plus faible, mais aussi une bonne opérabilité et une grande flexibilité

à satisfaire les conditions variables de l'environnement (économiques, écologiques, etc.).

Ce travail a ainsi permis de créer un programme pour :

- La mise en évidence du MER
- L'obtention du meilleur choix des utilitaires
- L'obtention des courbes composées et de la grande courbe composée

Ces rubriques ont conduit à la conception et/ou à l'adaptation d'un réseau d'échangeurs pour l'industrie.

7. Bibliographie

KALITVENTZEFF B., *Make use of the utility network to obtain flexible heat exchange network satisfying the minimum energy requirement. Energy Efficiency in Process Technology* Ed. P.A. Pilavachi, 1993.

LINNHOFF B. et al., *A user guide on process integration for the efficient use of energy*. The institution of chemical Engineers, 1982.

MARECHAL F., *Méthode d'analyse et de synthèse énergétiques des procédés industriels*, 1994.

PERRY R.H., CHILTON C.H., *Chemical Engineers' Handbook - 7th Edition*, Ed. McGraw Hill, 1999.

SMITH R., *Chemical Process design et integration*, McGraw Hill, 2005.