



Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
International Institute for Water and Environmental Engineering

INTEGRATION DE PROCEDES : APPLICATION DE LA TECHNOLOGIE PINCH A L'OPTIMISATION DES RESEAUX D'EAU ET DES ECHANGEURS DE CHALEUR

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR DE L'EQUIPEMENT RURAL

Présenté et soutenu publiquement le 02 juillet 2008 par :

MA-LOUM DJONKAMLA

Travaux dirigés par : **Dr. Yao AZOUMAH**
Enseignant-chercheur
UTER GEI

Jury d'évaluation du stage :

Président : Pr. Yezouma COULIBALY

Membres et correcteurs: Yao AZOUMAH
Francis SEMPORE
Philippe GIRARD

Promotion 2007/2008

« Il n'y a rien de nouveau sous le soleil. Ce qui a été, c'est ce qui sera, et ce qui s'est fait, c'est ce qui se fera. » Eccl.1 :9

*« La crainte de l'Éternel est le commencement de la science ... » en elle se trouve la véritable Connaissance qui
affranchit. Pr1 :7*

DEDICACES ET REMERCIEMENTS

Dédicace spécialement à toi Père Eternel, Maître de l'univers, source du savoir et de toute révélation, ma force et mon appui, je te louerai tant que je vivrai, Je te célébrerai tant que j'existerai.

Dédicace à vous DJONKAMLA Gouakreo et Falmata MENKREO à qui il a plu au Seigneur de confier cette noble tâche qui est mon éducation, mon encadrement et mon épanouissement ;

Dédicace à toi Konsébé DJONKAMLA, mise à part pour prendre soin de tes frères, que Dieu s'en souviennne et te bénisse à tous égards.

Mes remerciements s'en vont à l'endroit de tous les enseignants, en l'occurrence à mes distingués encadreur Dr Yao AZOUMAH et Dr Joël BLIN qui ont misé toute leur énergie et donner de tout leur cœur pour que ce mémoire soit une réussite que Dieu ouvre sur vous les écluses des cieux et que sa grâce soit votre partage selon l'infinie grandeur de sa bonté.

Quoique la liste ne soit pas exhaustive, je n'oublierai pas de citer Yezouma COULIBALY qui fut le tuyau transmetteur à travers lequel j'ai acquis des bases importantes en énergie, précisément en thermodynamique et transfert thermique.

Vous tous qui avez su me donner zèle et motivation, force et encouragement, je vous suis infiniment reconnaissant.

Soyez bénis.

LISTE DES ABREVIATIONS

IP : Intégration des Procédés

GES : Gaz à Effet de Serre

CC : Courbe Composite

CCC : Courbe Composite Chaude

CCF : Courbe Composite Froide

GCC : Grande Courbe Composite

HP, MP ou BP : Haute Pression, Moyenne Pression ou Basse Pression

BRAKINA : Brasserie du Burkina

GLOSSAIRE

Cible de consommation minimale d'énergie : Marge de consommation minimale d'énergie

Cible financière : Maximum investissement pour intégrer les projets d'économie d'eau et d'énergie identifiés.

Courant : mouvement de matière ou écoulement de fluide dans un procédé.

Courbes composites : Courbe enthalpie – température permettant de d'identifier la cible minimale de consommation d'énergie

Courbe Grand composite : Courbe composite modifiée permettant de dégager la charge énergétique de chaque utilité lorsque plusieurs utilités sont mises en jeux

ΔT_{min} : écart minimum de température entre la courbe composite chaude et la courbe composite froide.

Echangeur de chaleur : Système qui permet de transférer un flux de chaleur d'un fluide chaud à un flux froid à travers une paroi en contact direct entre les deux fluides.

Flow Sheet : de l'anglais ; désignant le schéma synoptique de l'installation et de l'enchaînement des opérations du procédé

Point de pincement ou Pinch point : point où l'écart entre la composite chaude et la composite froide est égal à ΔT_{min}

Procédé : Enchaînement des phases successives d'une opération de traitement ou de fabrication d'un produit industriel.

Retrofit : de l'anglais (modifier ou réajuster), utilisé dans ce document pour designer une installation existante à l'opposé d'une nouvelle conception

Utilité : fluide extérieur utilisé pour chauffer ou refroidir

SOMMAIRE

I. INTRODUCTION	3
I.1. Contexte du travail.....	3
I.2. L'intégration des procédés	4
II. LA TECHNOLOGIE PINCH : CONCEPTS DE BASE.....	7
II.1 Les étapes de l'analyse PINCH.....	7
II.1.1. Bilan de matière et d'énergie.	8
II.1.2. L'extraction des données.....	8
II.1.3. Les Courbes Composites et Grand Composites	10
II.1.4. Les Investissements.....	18
III. Etudes sur la minimisation de l'eau et de l'énergie	22
III. Etudes sur la minimisation de l'eau et de l'énergie	23
III.1 Système sans réutilisation des effluents.....	24
III .1.1 Etude du système : Optimisation des échangeurs de chaleur	25
III – 2. Système avec réutilisation des effluents	31
III .2 .1. optimisation des reseaux d'eau	31
III.2.2 Optimisation simultanée du système d'eau et d'énergie	32
IV. Conclusions et Perspectives	38
V. Bibliographie	39

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Les étapes de l'analyse Pinch.....	7
Figure 2 : Flow Sheet de l'installation.....	8
Figure 3 : construction des courbes composites	11
Figure 4 : Construction des courbes composites chaudes.....	11
Figure 5 : compromis entre coût d'énergie et investissement.....	13
Figure.6 : utilisation des courbes composites pour la détermination des cibles de consommation minimale d'énergie.	14
Figure 7 : Construction de la courbe Grand Composite	16
Figure 8 : Utilisation de la courbe GC pour déterminer les cibles de consommation d'énergie	

lorsque plusieurs utilités sont utilisées.....	17
Figure 9 : Utilisation des Courbes composites pour déterminer la surface d'échange de chaleur.	18
Figure 10: Le diagramme de grille	21
Figure. 11 : Enjeux du site industriel.....	24
Figure.12 : Répartition des débits des courants	25
Figure 13 : Génération des courants isothermes	26
Figure 14 : Courbe Composite avec les courants isothermes	26
Figure 15 : Diagramme de grille	26
Figure 16. Génération des systèmes séparés.....	27
Figure 17 : division et mélange de courants	27
Figure 18 : Structure finale du réseau – première option.....	28
Figure 19 : Systèmes séparés : 2 ^{de} alternative	29
Figure 20 : Structure finale du réseau deuxième option	29
Figure 21 : Exemples de tracés du réseau avec réutilisation d'eau	31
Figure 22 : Contraintes en contaminants et possibilités de réutilisation d'eau.....	31
Figure. 23 : Répartition de la demande en eau sur la variante (1)	32
Figure 24 : Diagramme bidimensionnel de grille	32
Figure. 25 : Réutilisation de l'eau cas 1.....	33
Figure. 26 : Réutilisation de l'eau cas 2.....	33
Figure. 27 : Réutilisation de l'eau cas 3.....	34
Figure. 28 : Réutilisation de l'eau cas.....	34
Figure. 29 : Cas 4. Schéma du réseau	35
Figure 30 : Courbe composite.....	36
Figure. 31 : Génération des systèmes séparés.....	36
Figure. 32 : Séparation et mélange des courants.....	36
Figure 33 : Structure finale du réseau avec réutilisation d'eau.....	37

I. INTRODUCTION

I.1. CONTEXTE DU TRAVAIL

Les différentes crises énergétiques successives (73-74, et depuis 2003 à ce jour) et les problèmes environnementaux actuels montrent bien l'intérêt de s'affranchir des énergies fossiles et/ou de diversifier les sources d'approvisionnement en énergie. Beaucoup d'efforts sont consentis dans ce domaine actuellement via le développement des énergies solaire, éolienne, géothermique et les bioénergies...

Cependant, le développement des sources d'énergie autre que fossiles n'est pas le seul point focal dans la résolution de cette crise énergétique. Des méthodes d'optimisation thermodynamique sont aussi développées afin de mieux utiliser les ressources disponibles telles que l'énergie, l'eau, l'hydrogène...dans les installations industrielles actuelles et mieux concevoir celles à venir.

Ces méthodes d'optimisation permettent non seulement d'économiser les ressources disponibles mais surtout de minimiser les rejets dans l'environnement (rejets thermiques, gaz à effet de serre, effluents...). Cette manière de procéder s'appelle **l'intégration des procédés (IP)**. L'une des techniques souvent utilisée dans l'intégration des procédés est **l'analyse Pinch ou l'analyse de Pincement**. C'est un ensemble d'approches thermodynamiques développées par des chercheurs Anglais Linnhoff et Vredeveld pour garantir l'économie d'énergie et d'eau au niveau de nouvelles conceptions de réseaux d'eau et d'échangeurs de chaleur dans les procédés industriels. Le stage proposé dans le cadre des travaux du présent mémoire s'est déroulé sous la tutelle du Laboratoire Biomasse, Energie et Biocarburant (LBEB) de l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE).

Trois grandes parties se dégagent de ce mémoire :

- la première partie parle de l'intégration des procédés de façon générale, allant de l'historique aux différentes méthodes de l'IP ;
- la deuxième partie est spécifiquement consacrée à la technologie pinch. Une démarche claire et concise sur la conduite de l'analyse pinch y est développée.
- La troisième partie proposée en illustration constitue en elle-même une méthodologie complète de l'application de l'analyse pinch pour l'optimisation simultanée des réseaux d'eau et d'échangeurs de chaleur.

I.2. L'INTEGRATION DES PROCÉDES

I.2.1. HISTORIQUE

Depuis 1970 jusqu'à nos jours, la question de l'utilisation efficiente de l'énergie et des matières premières (eau, hydrogène etc.) dans l'industrie suscite un intérêt particulier. Le développement de l'ingénierie des procédés connut alors un regain sans précédent. L'intégration des procédés est une branche très importante de l'ingénierie des procédés (James Gainey Mann, 1999). Elle se présente comme un outil d'optimisation des procédés industriels en réponse aux grandes problématiques industrielles telles que la réduction de la consommation de l'énergie, de l'eau et des matières premières ; la réduction des émissions des effluents et des gaz à effet de serre.

Initialement orientées vers l'énergie (Il était d'abord question d'optimiser les utilités dont l'énorme consommation induisait d'énormes dépenses dans l'industrie) les études d'IP ont abouti au développement de l'analyse pinch et des méthodes mathématiques d'optimisation des procédés par la récupération de l'énergie à travers une conception et une utilisation optimale des échangeurs de chaleur mis en réseau (heat exchanger network : HEN). Plus tard l'application de ces outils s'étendit dans le domaine de l'eau et bien d'autres ressources utilisées dans l'industrie (mass exchanger network : MEN) (Russel et Greg, 2000).

Au fil des années d'importantes améliorations ont été faites et des nouvelles approches d'optimisation sont mises au point. Parmi les plus récentes, nous pouvons retenir le développement des méthodologies traitant simultanément de la réduction de la consommation de l'énergie et des matières premières par le recyclage et la réutilisation des effluents ou des déchets. Hormis la recherche de la rentabilité, les efforts consentis sur la diminution des déchets, la minimisation du rejet des effluents et la réduction des émissions des GES furent accélérés par les exigences environnementales qui de plus en plus sont rigoureuses (Valarie et Raymond, 2004).

I.2.2. LES TECHNIQUES DE L'IP

Les techniques d'IP peuvent se classer en deux principales catégories que sont : Les méthodes mathématiques d'optimisation et les méthodes d'analyse et de déductions graphiques. Les deux méthodes conduisent à des résultats comparables à la différence près de leurs difficultés d'application.

La difficulté des programmations mathématiques réside dans la robustesse des algorithmes qu'elles génèrent et par conséquent les incertitudes qu'elles suscitent (Tantimuratha et al, 2000). Les mesures de simplification et d'améliorations apportées à ces modèles ont conduit à une récente méthode dite méthode stochastique d'optimisation. La méthode stochastique d'optimisation permet de dépasser les contraintes de non-linéarités, de non-convexité et de discontinuités de certains modèles.

Les méthodes graphiques sont pour la plupart l'analyse pinch appliquée à l'énergie, l'analyse pinch appliquée à l'eau ou à d'autres matières dans les procédés industrielles.

La technologie pinch elle-même est une approche thermodynamique qui fut premièrement introduite en 1978 par Linhoff (Mubarak, Al-Kawari, 1999). Elle permet de déterminer la cible de consommation minimale d'énergie, la surface minimale d'échange de chaleur ainsi que le nombre minimum d'échangeurs de chaleurs à prévoir pour y parvenir. Elle vise par voie de conséquence l'évaluation de l'investissement minimum à mobiliser pour parvenir à atteindre cette cible de consommation et la marge de rentabilité susceptible d'être dégagée.

La technologie pinch a apporté des changements significatifs dans le domaine de la récupération de l'énergie. Elle a connu une large diffusion à cause de la simplicité de sa démarche et aussi grâce au grand nombre de succès obtenus dans les multiples cas d'application à travers le monde. (Tantimuratha et al, 2000).

L'application systématique de ces technologies est facilitée par l'utilisation des logiciels d'analyses et de simulations des procédés, développés à cet effet.

I.2.3. LE DOMAINE PARTICULIER DE L'EAU

Les conditions environnementales de plus en plus rigoureuses, et le coût élevé induit par le traitement de l'eau ont conduit, les industries à réduire leur consommation en eau. Aussi le développement des techniques systématiques de réduction de la consommation d'eau par la recyclage ou la réutilisation des effluents a connu un développement sans précédent. (Y. L. Tan et al. 2007).

Trois approches sont applicables pour réduire la consommation excessive de l'eau (Detchasit et Thongchai, 2003): la réduction par le réajustement des installations ou la modification des procédés pouvant contribuer à réduire la demande de base, la réduction par le recyclage et réutilisation et en fin la réduction par la régénération de l'eau après un traitement partiel ou complet.

Wang et Smith (1994) furent les premiers à proposer une méthode basée sur l'analyse pinch permettant de minimiser la consommation de l'eau par le recyclage, la régénération et la réutilisation des effluents. Plutard Kuo et Smith proposèrent une méthodologie permettant de parvenir au mieux à la cible minimale de consommation d'eau. D'autres auteurs comme Castro *et al*, (1999) ont travaillé à étendre la méthodologie en y incluant des multiples contraintes. Les premières méthodes d'optimisation mathématique ont été introduites par Takama et al (1980) dans le domaine de raffinage de pétrole. Il était alors question d'optimiser les réseaux d'eau par la réutilisation des effluents en scrutant toute stratégie de recyclage d'eau ou de régénération. La technologie pinch appliquée aux installations existantes (retrofit) a été introduite par Tjoe et Linnhoff (1986). L'analyse consistait à minimiser la consommation de l'énergie en augmentant la capacité d'échange de chaleur et en optimisant l'utilisation des échangeurs de chaleurs existants. Le domaine de l'eau et d'autres ressources (minimisation de l'eau et de la matière première dans les usines existantes) connu plutard l'extension de cette dernière approche. Les premiers travaux sur l'analyse pinch appliquée à l'eau ont été ceux de Tan et Manan (2003 et 2004). En ce qui concerne l'optimisation mathématique, deux approches ont été indépendamment développées par Jödicke *et al*. (2001) et Huang *et al*. (1999).

L'avènement de la technologie pinch pour la conception et l'optimisation des réseaux d'eau fut l'une des plus importantes avancées dans le domaine de la minimisation de la consommation de l'eau.

II. LA TECHNOLOGIE PINCH : CONCEPTS DE BASE

La technologie pinch est une méthodologie systématique basée sur les principes thermodynamiques, permettant de réduire la consommation de l'énergie dans les procédés industriels ou dans le site industriel en général (Linnhoff March, 1998). Le terme « Analyse Pinch » est souvent utilisé pour désigner l'application des outils et des algorithmes de la technologie pinch pour l'étude d'un procédé industriel.

Dans les procédés industriels, il y a échange permanent de chaleur entre les courants du procédé d'une part et d'autre part entre les courants du procédé et les utilités. Le but de l'analyse pinch est de déterminer la cible de consommation minimale d'énergie, de prévoir une conception optimale de réseau d'échangeurs de chaleur et d'identifier le coût minimum en capitaux pour atteindre la cible de consommation en minimisant l'utilisation des utilités les plus coûteuses par l'optimisation du transfert de chaleur entre les courants du procédé.

La technologie pinch est fondamentalement basée sur le premier et le second principe de la thermodynamique. Le premier principe de la thermo donne les bases de calculs du bilan de chaleur et matières et le second principe fixe les conditions de transfert de chaleurs entre les courants chauds et froids au sein du procédé.

II.1 LES ETAPES DE L'ANALYSE PINCH

De manière succincte l'analyse pinch peut se résumer par le diagramme ci-contre :

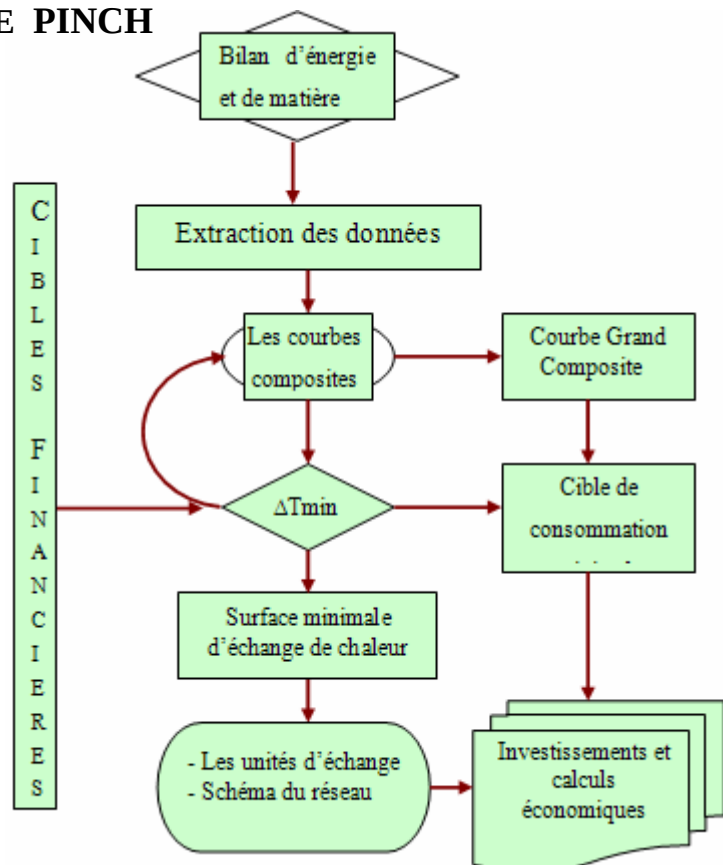


Figure 1 : Les étapes de l'analyse Pinch

II.1.1. BILAN DE MATIERE ET D'ENERGIE.

L'analyse pinch commence par le bilan de matière et d'énergie. Il s'agit ici de relever à l'échelle du procédé les grandeurs caractéristiques de chaque courant de matières à savoir les températures, les débits et les pressions. Le bilan de matière et d'énergie fournit l'essentiel de la base de données nécessaire à l'extraction des données.

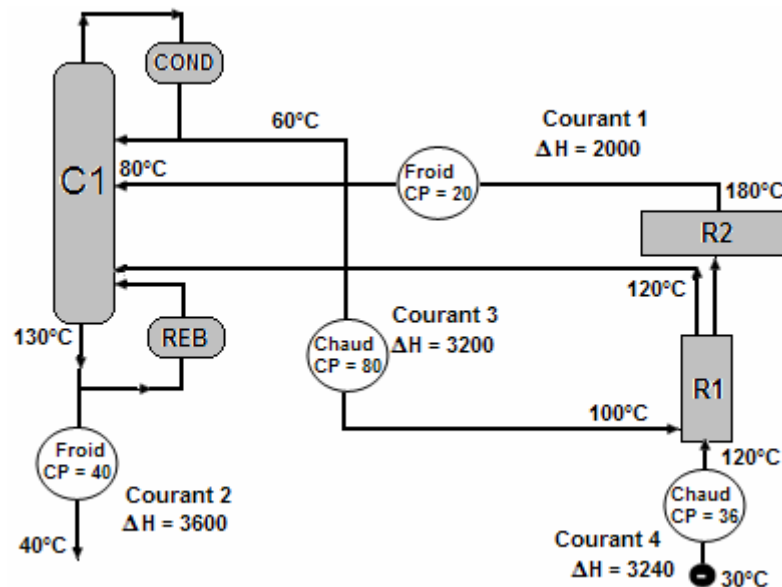


Figure 2 : Flow Sheet de l'installation

Source: Linnhoff March, Introduction to pinch technology, 1998

II.1.2. L'EXTRACTION DES DONNEES

Les données nécessaires à l'analyse pinch sont extraites à partir du bilan de matière et d'énergie.

- **Caractérisation des Courants et des Utilités**

L'extraction des données est l'étape qui consiste à caractériser les courants de matières et les utilités. On désigne par :

- *Source* ou *Courant chaud* tout courant de matière qui doit être refroidi et qui contient par conséquent de l'énergie récupérable. *Puits* ou *Courant froid* : tout courant qui doit être chauffé ou qui nécessite de l'énergie pour satisfaire les besoins du procédé.
- *Utilité* : tout fluide extérieure, n'intervenant pas directement dans les opérations, mais utilisée simplement pour le chauffage ou le refroidissement. Par exemple

le gaz chaud, les vapeurs HP, ou de l'eau chaude pour les *utilités chaudes* et l'eau de refroidissement ou des fluides de réfrigération pour les *utilités froides*.

- **L'extraction des données thermiques**

Chaque courant de matière et utilité est caractérisé par :

- sa température d'entrée (T_s) et sa température requise dans le procédé (T_t);
- son débit massique : $\dot{m}$ (kg/s)
- sa capacité calorifique: $CP = \dot{m} \times cp$ (kW/°C) où cp est la capacité spécifique massique en $kg/kJ \cdot ^\circ C$;
- sa chaleur latente de changement de phase : L (kJ/kg) ;

A partir de ces données, est déterminée la variation de l'enthalpie de chaque courant passant dans l'échangeur de chaleur en contact avec d'autres courants ou utilités.

A pression constante et à vitesse constante : $\Delta H = Q$ où Q (kW) = $CP \times \Delta T$ représente la charge thermique avec $\Delta T = (T_t - T_s)$.

Dans le cas du « retrofit » les données supplémentaires sur les unités d'échange de chaleurs existantes (surface totale d'échange de chaleur disponible, les coefficients de transfert chaleur dans les échangeurs) et sur les utilités existantes dans le procédé (température, pression, débit, coût etc.) doivent être recueillies.

Pour le cas représenté à la figure.2 les données extraites sont représentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau1 : Exemple d'extraction de données

Courant	Type de courant	Température d'alimentation T_s (°C)	Température requise : T_t (°C)	Variation de l'enthalpie : ΔH (kW)	Capacité calorifique : CP (kW/°C)
1	Chaud	180	80	2000	20
2	Chaud	130	40	3600	40
3	Froid	60	100	3200	80
4	Froid	30	120	3240	36

Source: Linnhoff March, Introduction to pinch technology, 1998

Pour cet exemple l'utilité chaude est un courant disponible à 200°C tandis que l'utilité froide est de l'eau de refroidissement approvisionnée à une température comprise entre 25 et 20°C.

II.1.3. LES COURBES COMPOSITES ET GRAND COMPOSITES

- **Courbes Composites**

La courbe composite est la représentation graphique de l'enthalpie en fonction de la température. On distingue deux courbes composites : une courbe composite chaude et courbe composite froide (figure 3).

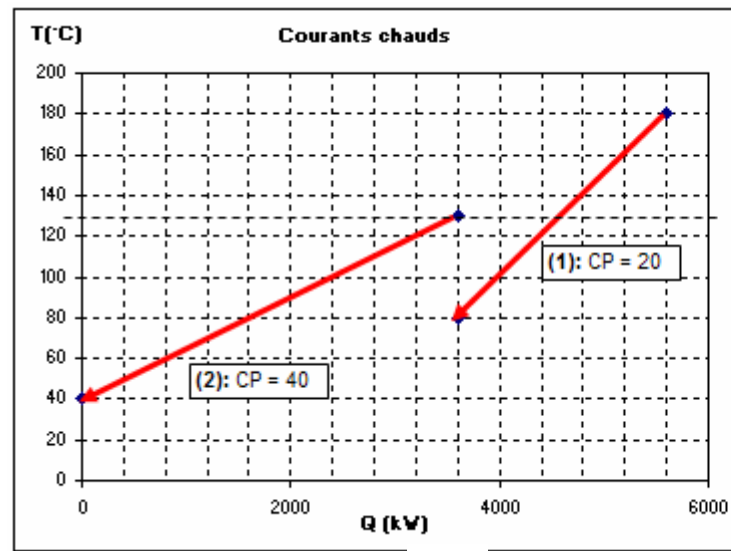
La courbe composite chaude est construite à partir des données des courants chauds et la courbe composite froide à partir de celles des courants froids.

Tracé de la Courbe Composite chaude :

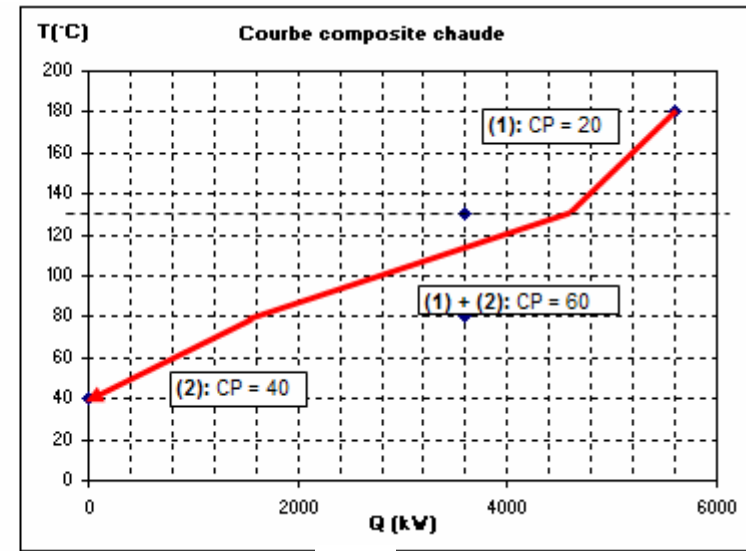
- 1- Repérer la zone du tracé de la composite chaude par la température d'amener du courant le plus chaud et la somme de toutes les charges thermiques chaudes.
- 2- Représenter chaque source en commençant par la source la plus chaude (figure 3.a). Les pentes des tracés sont égales aux CP des courants respectif.
- 3- Pour les températures intermédiaires, la valeur de la pente de la courbe composite est égale à la somme des CP des courants intermédiaires (figure 3.b).

La même procédure est utilisée pour le tracé de la courbe composite froide.

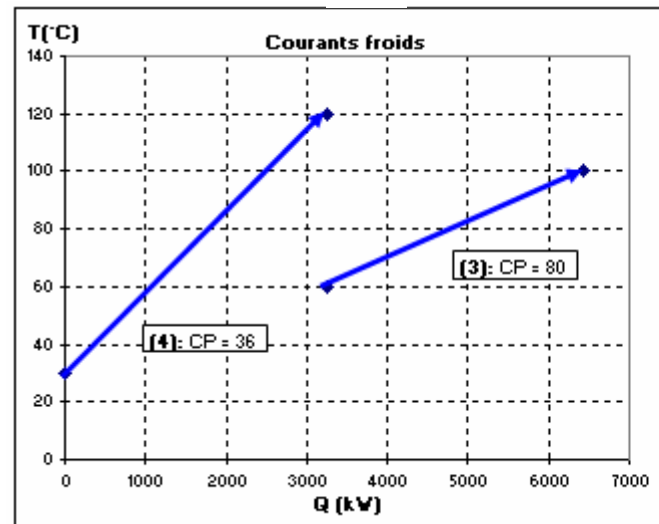
Pour l'exemple (1) : la zone de tracé de la courbe composite est repéré par $\Delta X = \sum \Delta H = 5600 \text{ W}$ et $\Delta Y = 180^\circ\text{C}$. Dans l'intervalle de température allant de 180°C à 130°C , seul le courant 1 est présent. La valeur CP de la courbe composite est égale à 20. Dans l'intervalle de 130°C à 80°C , deux courants sont disponibles : le courant 1 et le courant 2 $\Rightarrow \text{CP} = 20 + 40 = 60$. Dans l'intervalle de 80°C à 40°C , seul le courant 2 est présent : $\text{CP} = 40$



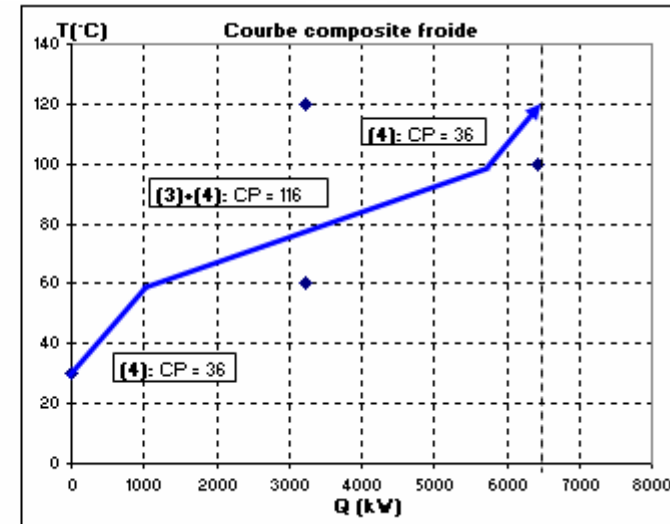
[a]



[b]



[a]



[b]

Figure 3 : construction des courbes composites

Figure 4 : Construction des courbes composites chaudes

- **Cible de consommation minimale**

Les deux courbes composites (chaude et froide) sont ensuite placées sur un même graphique (figure 4). La composite froide est placée sous la composite chaude à un écart minimum admissible de température appelé ΔT_{min} . *Cet écart correspond à la différence minimale de température acceptable entre deux courants passant à travers l'échangeur de chaleur.*

$$\text{Temp. Courant chaud} - \text{Temp. Courant froid} \geq \Delta T_{min} \text{ en tout point de la CC}$$

Pour le cas d'illustration, une valeur de ΔT_{min} de 10°C a été retenue. Le point de rapprochement maximum des deux courbes composites i.e : le point où ΔT_{min} est atteint est appelé « point de pincement » ou « pinch point » en anglais. De cette appellation découle le nom de la présente technologie : « l'Analyse Pinch ». Le point ici correspond à 70°C sur la CCC et 60° sur la CCF. La cible de consommation minimale d'énergie est identifiée sur les courbes composites. L'écart entre les courbes composites donne les besoins minimum de refroidissement Q_{Cmin} et en chauffage Q_{Hmin} du procédé respectivement à l'extrémité inférieure gauche et supérieure droite du graphique. La zone de recouvrement entre les deux courbes composites représente le potentiel maximum de récupération de l'énergie thermique.

Pour le ΔT_{min} de 10°C on a : $Q_{Cmin} = 120 \text{ kW}$ et $Q_{Hmin} = 960 \text{ kW}$.

Sur le procédé existant, la demande en utilité de chauffage est de 1200 kW et la demande en utilité de refroidissement est de 360 kW . L'analyse pinch nous permet donc de récupérer une quantité d'énergie de : $1200 - 960 = 240 \text{ kW}$ du côté du chauffage et $340 - 120 = 220 \text{ kW}$ du côté du refroidissement.

- **Choix du ΔT_{min}**

La cible minimale de consommation d'énergie est intrinsèquement dépendante de la valeur du ΔT_{min} choisie.

L'analyse des courbes composites nous montre que plus le ΔT_{min} est grand plus la zone de recouvrement entre les deux courbes composite ou le potentiel de récupération d'énergie diminuent conduisant à une augmentation des besoins en refroidissement et en chauffage. La diminution de la zone de recouvrement est synonyme de la diminution de la surface d'échange de chaleur et conséquemment la réduction du coût des échangeurs. Dans ce cas le coût élevé d'énergie (coût des utilités) est relativement compensé par un coût d'investissement (coût des échangeurs de chaleur) plus faible.

A l'opposée plus ΔT_{min} est petit, plus la zone de récupération d'énergie entre les deux courbes composites augmente et les besoins en refroidissement et en chauffage sont réduits. L'augmentation du potentiel de récupération d'énergie se traduit par une augmentation de la surface d'échange de chaleur conduisant à une élévation du coût des échangeurs de chaleur. Le coût faible de l'énergie semble alors compensé le coût élevé de l'investissement.

Un meilleur compromis entre coût d'énergie et investissement en capital doit être effectué par le choix d'un ΔT_{min} optimum.

Le choix du ΔT_{min} optimum s'opère sur un graphique « Energie – Coût », graphique qui représente la variation annuelle du coût d'exploitation (coût d'énergie + investissement) en fonction du ΔT_{min} (figure 5). Le ΔT_{min} optimum est celui qui minimise simultanément le coût de l'énergie et le coût d'investissement.

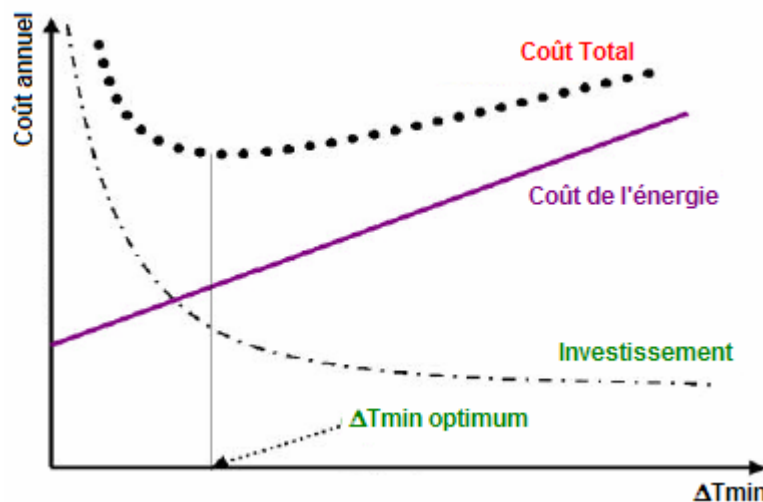


Figure 5 : compromis entre coût d'énergie et investissement.

Source: Chemical Engineer's Resources page, Introduction to pinch technology

Les expériences acquises dans le domaine de l'analyse pinch ont conduit à retenir des marges de ΔT_{min} selon les domaines habituels d'application.

Tableau 2 : Marge de ΔT_{min} en pratique

Secteur d'application	Observations	Marge de ΔT_{min}
Raffinerie	Faible coefficient de transfert de chaleur, encrassement des échangeurs de chaleur	20 – 40°C
Pétrochimie et Chimie (procédés chimiques)	Les utilités passent à travers un échangeur de chaleur	10 – 20 °C
Procédés à basse température	Procédés à basse température	3 – 5 °C

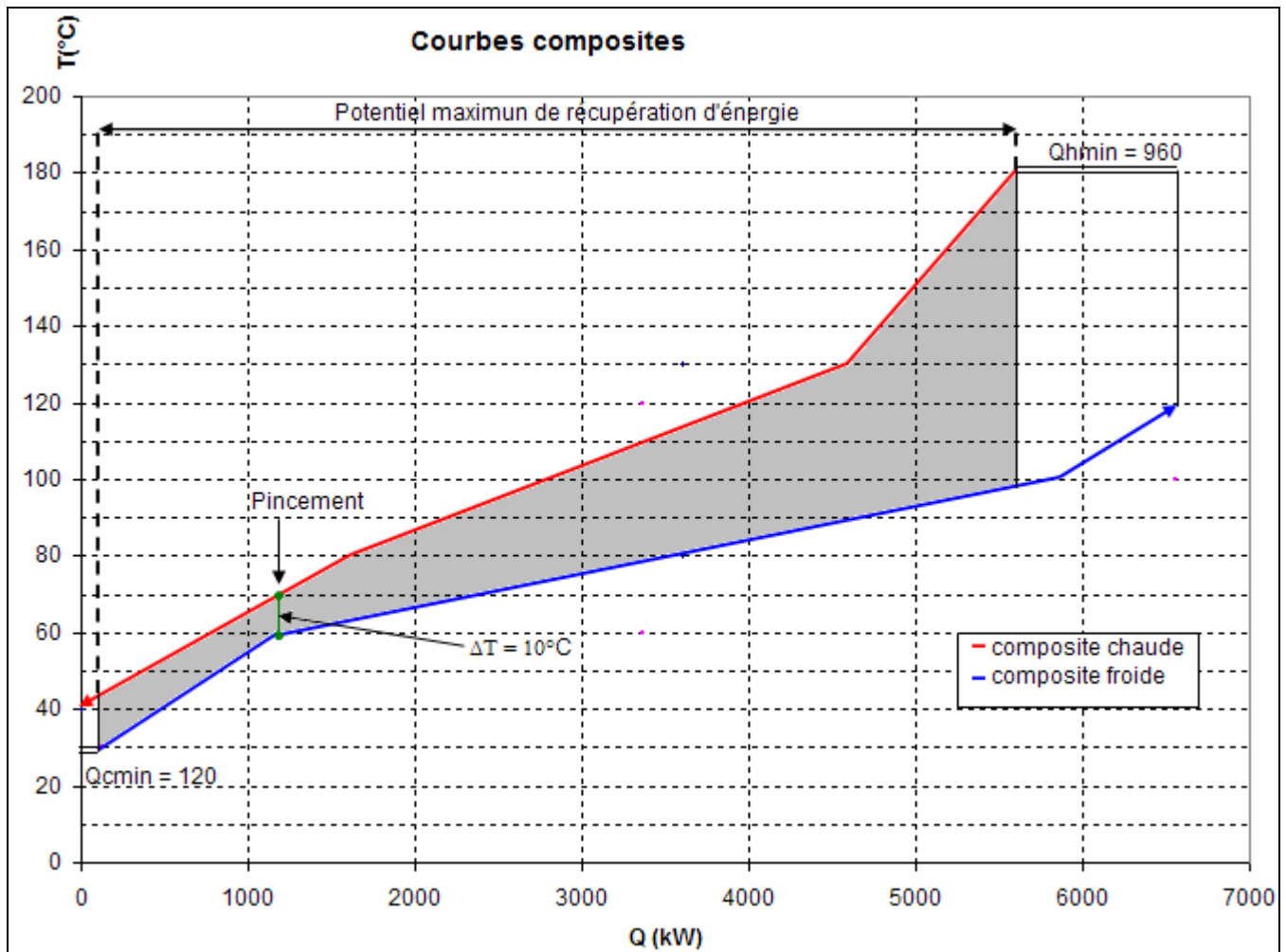


Figure.6 : utilisation des courbes composites pour la détermination des cibles de consommation minimale d'énergie.

- **Principe de l'analyse pinch**

En considérant le point de pincement, nous pouvons séparer le graphe composite en deux sous-systèmes, placés en haut et en bas de part et d'autre du point de pincement. Le sous système au dessus du point de pincement ne requiert que de la chaleur et peut être dès lors assimilable à un « puits » tandis que celui d'en bas ne nécessitant que du refroidissement est assignable à une source. Le transfert d'une quantité α de chaleur du sous-système supérieur vers le sous-système inférieur nécessite systématiquement une compensation par une même quantité de chaleur α que doivent fournir les utilités chaudes afin de maintenir les cibles de consommation minimales (2nd principe de la thermodynamique). En conséquence, le transfert d'une quantité d'énergie α à travers le point de pincement entraînerait inutilement l'augmentation des besoins en utilités chauds et froids pour atteindre la cible de consommation minimale. De cette observation, trois

règles de bonne conduite de l'analyse pinch sont déduites :

- Eviter tout transfert de chaleur à travers le point de fonctionnement ;
- Eviter de refroidir un courant qui se trouve au dessus du point de pincement ;
- Eviter de surchauffer un courant un courant qui se trouve en dessous du point de pincement.

- **La courbe Grand Composite (CGC).**

Dans les procédés industriels, le besoin en refroidissement ou en chauffage est souvent pourvu à l'aide de plusieurs utilités (eau de refroidissement, vapeur d'eau à différentes pressions, circuit d'huile etc.). Le but recherché est de réduire le coût de l'énergie en maximisant l'utilisation des utilités les moins chères et en minimisant l'utilisation des utilités les plus chères. Par exemple il est plus avantageux de faire usage des vapeurs basse pression (BP) que de la vapeur haute pression (HP) ou encore de l'eau de réfrigération plutôt que d'avoir à faire à un système de réfrigération.

La courbe composite met en évidence la cible de consommation minimale mais ne permet pas d'identifier l'apport de chaque utilité mis en jeux pour atteindre cette cible. La CGC est l'outil qui permet de déterminer la cible de consommation minimale d'énergie de chaque utilité lorsque plusieurs utilités sont utilisées dans le procédé.

Construction de la courbe Grand Composite :

La CGC est construite à partir des courbes CC selon la procédure suivante :

- 1- Décaler verticalement la CC froide et la CC chaude d'une distance de $\frac{1}{2}\Delta T_{min}$ respectivement vers le haut et vers le bas de telle manière que les deux courbes se touchent au point de pincement. *Cette manœuvre garantie systématiquement un écart minimum de température égale à ΔT_{min} entre les utilités mis en jeux et les courants correspondants.*
- 2- le tracer se fait en reportant sur un graphe, à partir de l'axe des températures, l'écart de température entre les deux courbes décalées (figure 5).

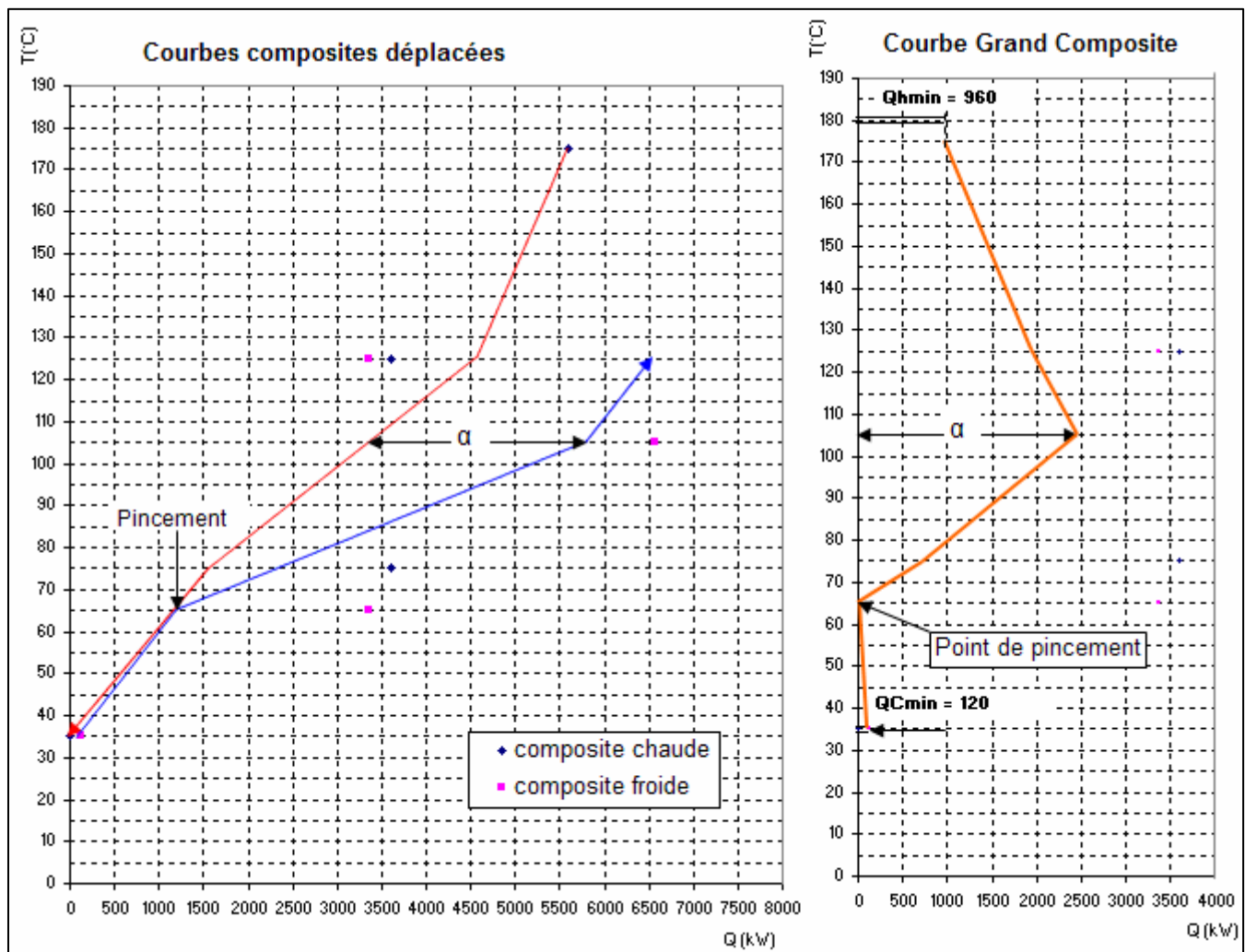


Figure 7 : Construction de la courbe Grand Composite

La figure (6a) représente la CGC dans le cas d'utilisation d'une seule Utilité HP. Dans le souci de réduire le coût d'exploitation, une ou plusieurs utilités de MP ou de BP peuvent être introduites afin de diminuer les utilités HP. La cible de l'utilité BP s'obtient en traçant un trait horizontal depuis l'axe vertical (axe des températures), à la température à laquelle l'utilité BP est disponible jusqu'à la CGC. Le segment de droite obtenu entre l'axe vertical et la CGC représente la cible de consommation des utilités BP (figure 6b). La cible minimale des utilités MP est obtenue de la même façon mais cette fois la verticale considérée est celle passant par la limite de la cible BP. La portion de segment restante en fin de compte désigne la cible finale des utilités HP. En dessous du point de pincement, l'on peut adopter les mêmes mesures en favorisant l'utilisation de l'eau de refroidissement afin de réduire les utilités de refroidissement ou d'éviter la mise en place d'un gigantesque système de refroidissement.

La zone colorée en vert représente le potentiel de récupération de l'énergie au sein du procédé.

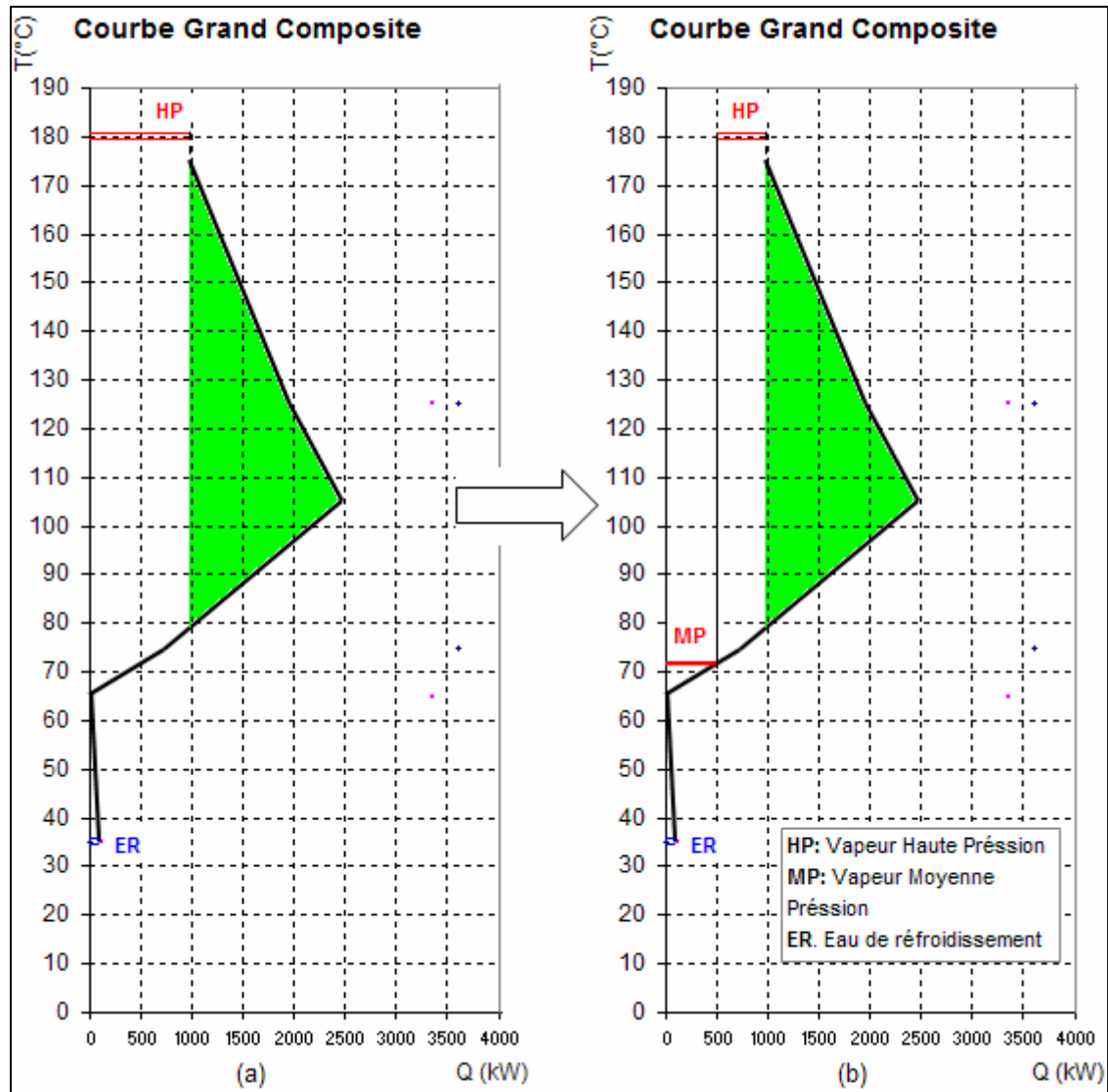


Figure 8 : Utilisation de la courbe GC pour déterminer les cibles de consommation d'énergie lorsque plusieurs utilités sont utilisées.

II.1.4. LES INVESTISSEMENTS

L'estimation du coût d'investissement découle de la surface totale d'échange de chaleur et du nombre minimale d'échangeurs de chaleur.

- **Surface minimale d'échange de chaleur**

L'analyse pinch nous permet de déterminer la surface minimale d'échange de chaleur nécessaire pour satisfaire la cible de consommation minimale. Cette estimation se fait à partir des CC. Pour cela, on trace des verticales à partir de chaque point de changement de pente indifféremment sur les deux CC. Ainsi, le graphe composite est divisé en autant d'intervalles qu'il y a des points de changements de direction sur les deux CC (figure.7).

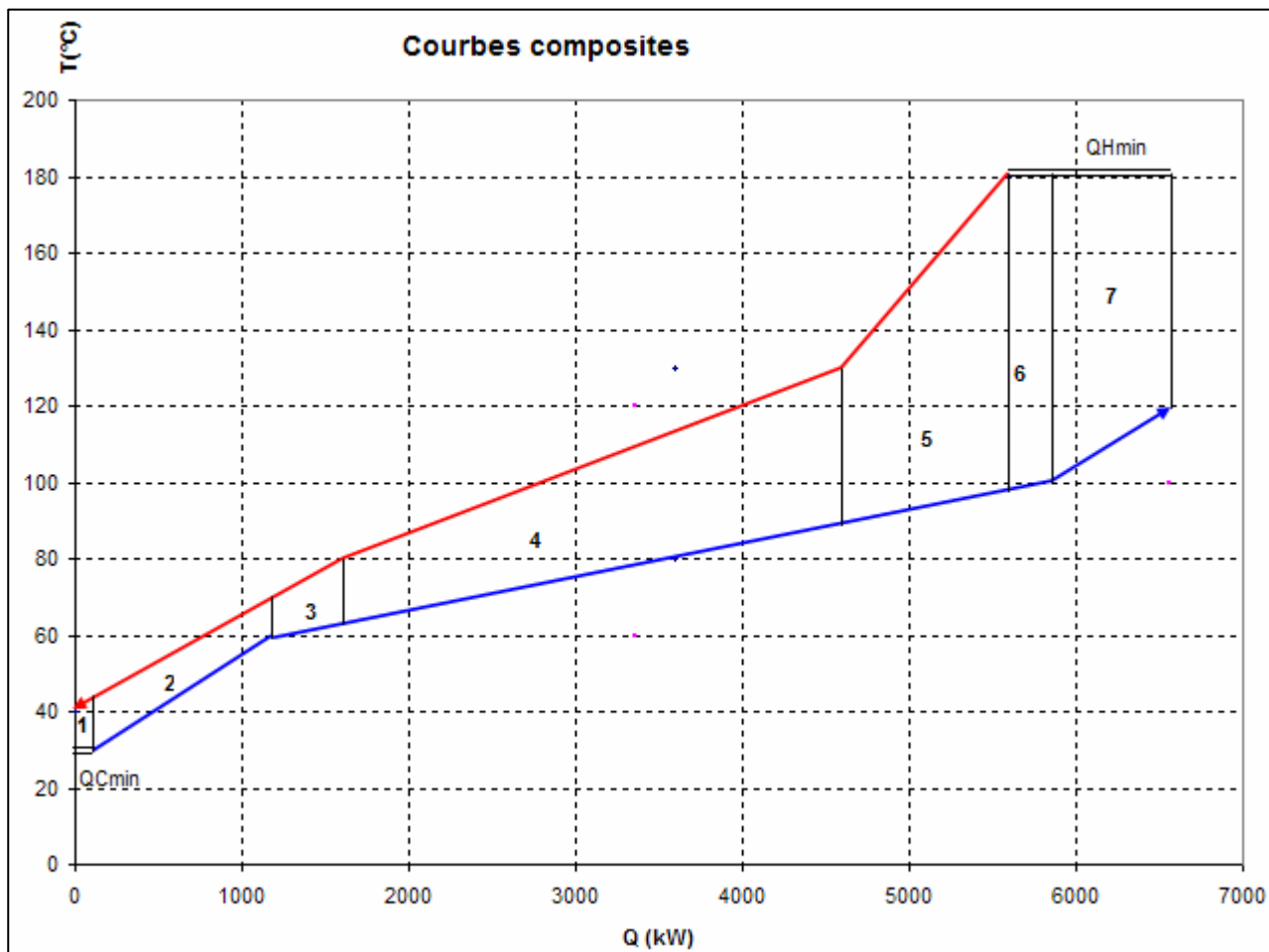


Figure 9 : Utilisation des Courbes composites pour déterminer la surface d'échange de chaleur.

La surface minimale d'échange de chaleur est donnée par la formule :

$$A_{min} = \sum_{i=1}^n A_i = \sum_i \left[\frac{1}{\Delta T_{LM}} \sum_j \frac{q_j}{h_j} \right] \quad (1)$$

Avec,

i : numérotation des intervalles ;

j : numérotation des courants

ΔT_{LM} est la moyenne logarithmique de la température entre l'entrée et la sortie de l'échangeur.

q_j est la variation de l'enthalpie du courant j.

- **Nombre minimum d'échangeurs de chaleurs**

Le nombre minimum des échangeurs de chaleur est donné par le théorème d'Euler:

$$N_{min} = [N_h + N_c + N_u - 1]_{AP} + [N_h + N_c + N_u - 1]_{BP} \quad (2)$$

Où N_h = Nombre des courants chauds

N_c = Nombre des courants froids

N_u = Nombre des utilités

AP : qui sont au dessus du point de pincement

BP : qui sont en dessous du point de pincement.

- **Coût d'achat des échangeurs des chaleurs**

Une relation permet de déterminer approximativement le coût d'achat des échangeurs de chaleur à installer une que fois la surface totale d'échange est connue et le nombre minimum des échangeurs de chaleur déterminé.

$$C(\$) = [N_{min} \{a + b(A_{min}/N_{min})^c\}]_{AP} + [N_{min} \{a + b(A_{min}/b_{min})^c\}]_{BP} \quad (3)$$

Les coefficients a, b et c dépendent du type d'échangeur de chaleur (spirale, tube et calandre, plaque etc.)

- **Coût des utilités ou coût de l'énergie :**

Le coût unitaire de l'utilité est donné en fonction de l'unité de la charge thermique supportée. Le coût total est calculé par la relation suivante :

$$\text{Coût des utilités} = \sum_i^n Q_i \times C_i \quad (4)$$

Avec :

Q_i : Charge thermique de l'utilité i en kW

C_i : coût de l'utilité i (\$/kW)

n : nombre des utilités mises en jeu.

II.1.5. CONCEPTION FINALE

Après la détermination du nombre d'échangeurs de chaleur nécessaires, l'étape suivante consiste à appairer et à diviser les courants selon les exigences en chauffage ou en refroidissement du procédé. Les échangeurs de chaleur sont alors mis en réseaux. Leur répartition est faite suivant l'appariement et la division des courants. Les utilités sont par la suite introduites et mise en contact indirect avec les courants à travers les échangeurs de chaleur afin de pourvoir aux besoins (chauffage et refroidissement) complémentaires du procédé. L'ensemble ainsi obtenu est présenté sur un schéma synoptique appelé « diagramme de grille ».

- **Le diagramme de grille**

Les courants chauds sont tracés au dessus et sont dirigés de la gauche vers la droite. Les courants froids sont tracés en dessous et vont de la droite vers la gauche. Les échangeurs de chaleur sont représentés par des segments verticaux bornés par deux cercles dans lesquels passent les deux courants mis en contact.

La ligne centrale représente le point de pincement qui est définie par les températures au point de pincement sur la composite chaude et sur la composite froide. Cette ligne est donc le point de démarcation entre la zone située au dessus du point de pincement (cf. principe de l'analyse pinch) représentée à gauche et la zone située en dessous du point de pincement représentée à droite.

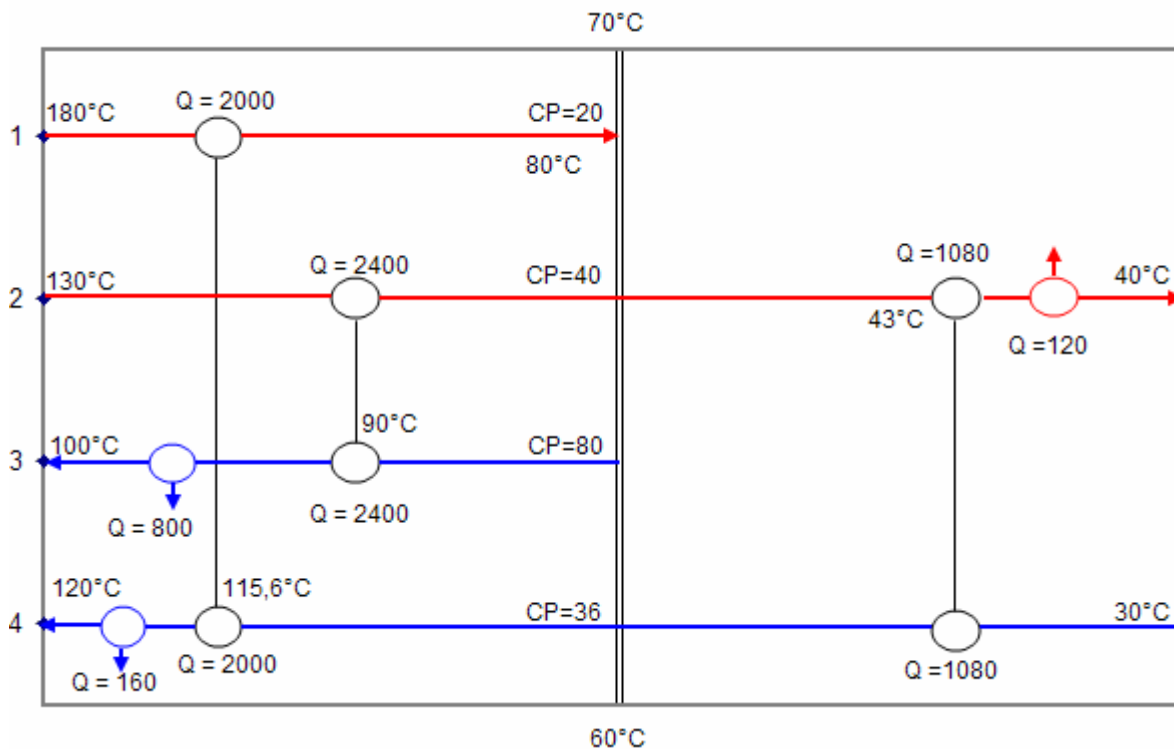


Figure 10: Le diagramme de grille

Appariements des courants

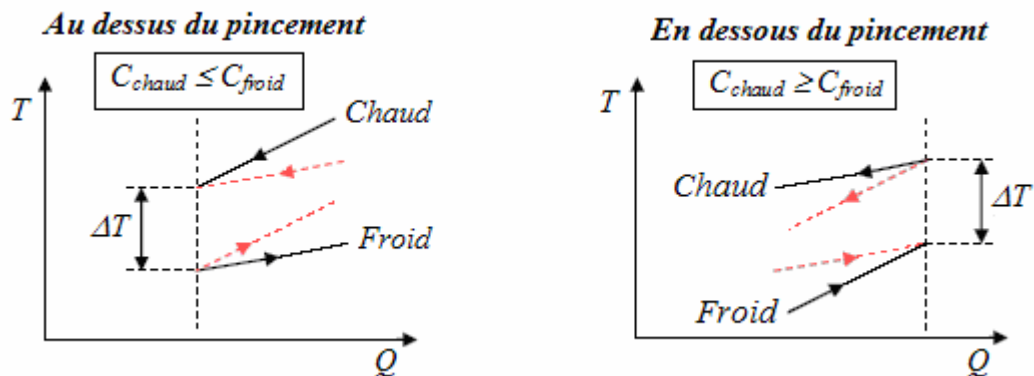
Selon le principe de l'analyse pinch sur lequel est basé la construction du diagramme de grille, on ne doit pas refroidir les courants situés au dessus du point de pincement (à gauche du diagramme) et moins encore réchauffer les courants qui sont situés en dessous du point de pincement. Aussi, les courants chauds du dessus du pincement sont amenés au point de pincement par échange de chaleur avec les courants froids du même côté. Pareillement pour les courants froids d'en dessous qui sont amenés au point de pincement par échange de chaleur avec les courants chauds du même côté.

Les utilités interviennent pour fournir le complément en énergie pour satisfaire les besoins du procédé (chauffage au dessus du pincement et refroidissement en dessous du pincement).

Pour assurer l'échange de chaleur au sein de l'échangeur, l'écart minimal de ΔT_{min} doit être maintenu entre les courants appariés. Ce qui conduit à la règle suivante:

- Au dessus du point de pincement, c'est-à-dire à gauche du diagramme, un courant chaud et un courant froid ne sont associables que lorsque le CP du courant chaud est inférieur à celui du courant froid.
- En dessous du point de pincement, à droite du diagramme, c'est exactement le

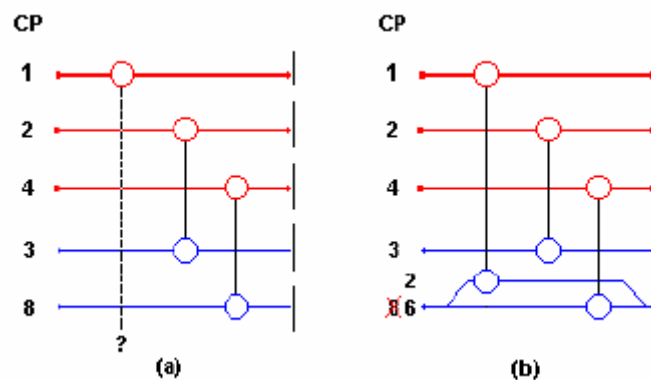
contraire : lorsque le CP du courant froid est inférieur au CP du courant chaud, c'est alors que l'appariement devient possible.



✎ Division des courants

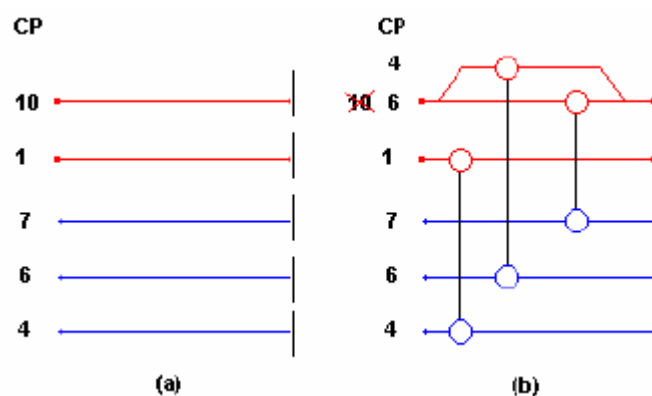
Selon la règle chaque courant qui rentre dans le pincement doit être apparié à un courant qui y sort. La division des courants intervient lorsque le nombre de courant allant vers le pincement est inférieur au nombre de courants qui y sortent.

Critère de division de courant basé sur le nombre de courant



Les courants sont également divisés lorsque la condition de CP n'est pas satisfaite. Lorsque le CP du courant entrant dans le pincement est supérieur au CP du courant sortant du pincement, le courant est alors divisé afin de réduire son CP.

Division des courants afin de satisfaire la condition de CP



III. ETUDES SUR LA MINIMISATION DE L'EAU ET DE L'ENERGIE

L'eau sous ses divers états, est l'une des principales ressources utilisées intensément dans les procédés industriels. Elle est un élément essentiel, voire vital dans le déroulement de plusieurs procédés industriels (industrie agro-alimentaire, pâtes et papier, raffinerie de pétrole etc.). Elle intervient directement dans les différentes opérations industrielles ou indirectement sous forme d'utilités (eau de refroidissement, vapeur BP, MP ou HP).

La consommation de l'eau et de l'énergie se place au centre des problématiques industrielles. Elle mobilise d'énormes capitaux dans le budget des industries, d'où l'intérêt capital de la question de l'utilisation rationnelle de l'eau et de l'énergie.

D'importantes améliorations sont de plus en plus apportées dans le domaine de l'analyse pinch en vue de réduire davantage la consommation d'énergie et de l'eau. Le but recherché se traduit par l'optimisation des réseaux d'eau et des échangeurs de chaleur dans les installations industrielles.

Une étude sur l'utilisation rationnelle de l'eau et de l'énergie a été menée à cet effet en 2003 par L. Salvulescu et al. La recherche de l'efficacité énergétique conjuguée à la consommation minimale de l'eau dans les procédés industriels constitue la particularité de cette étude.

Dans la suite du document, nous reprenons ces études dans le but d'expliquer au mieux les démarches aboutissant à l'utilisation efficace simultanément de l'eau et de l'énergie. Cette analyse est une nouvelle méthodologie qui permet une récupération directe d'énergie à travers le mélange des courants. L'une des contraintes à cette action est la différence en concentration des contaminants contenus dans les courants mis en jeux.

III.1 SYSTEME SANS REUTILISATION DES EFFLUENTS

Problématique

Dans les procédés industriels, les caractéristiques physico – chimiques des courants d'eau sont perpétuellement sujettes aux modifications selon les exigences et les contraintes des opérations au niveau desquelles ils interviennent. Selon sa disponibilité à la source (conditions initiales) et son transit entre les différentes unités, le refroidissement ou le chauffage de l'eau est souvent nécessaire. Des exigences environnementales s'imposent souvent aux effluents qui doivent respecter un certain niveau de température et un seuil maximum de concentration en contaminant avant le rejet.

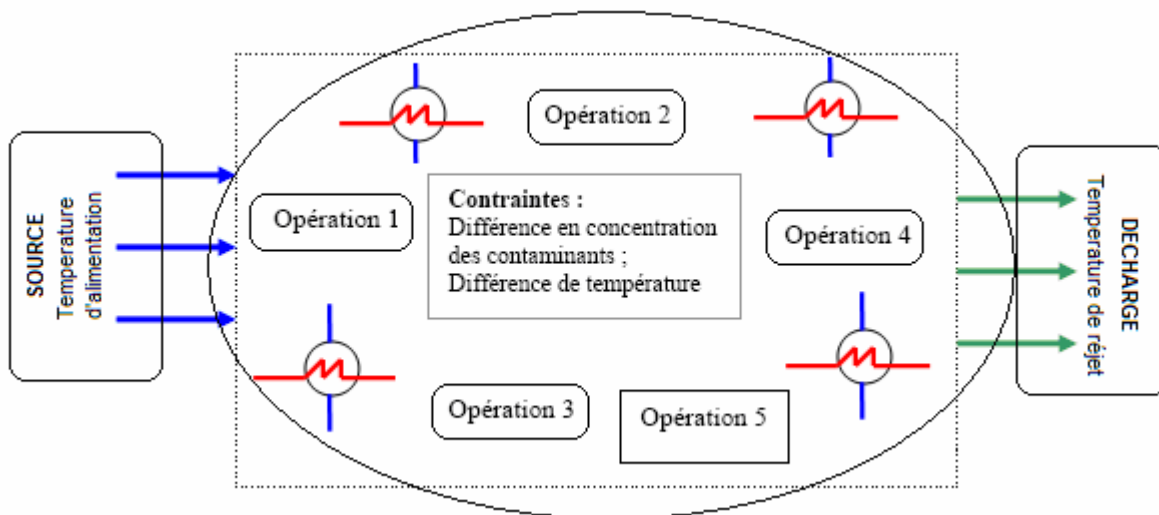


Figure. 11 : Enjeux du site industriel

Sources : Luciana S. et al (2003)

Hypothèses

Afin de simplifier l'analyse du système du point de vue énergie, les hypothèses suivantes en rapport avec les conditions d'opération (débit, température et concentration en contaminants), et les conditions d'approvisionnement en eau (nombre et qualité de sources d'eau ainsi que les types de courant) ont été définies :

1. chaque opération se déroule à une température donnée. Les opérations sont supposées isothermes. Il n'y a ni perte ni gain de chaleur au sein des opérations.
2. chaque courant d'eau est spécifié par sa température d'entrée et de sortie, son débit d'alimentation et sa concentration maximale en contaminant à l'entrée et à la sortie de l'opération.
3. Un seul type de contaminant est présent dans l'ensemble du procédé.

4. Le système est étanche (pas de fuite ou de gain d'eau). Le débit d'eau est constant à l'entrée et à la sortie des opérations.
5. Le ravitaillement est fait par une seule source d'approvisionnement.
6. Il n'y a pas des exigences sur la qualité chimique des effluents à leur rejet.
7. La température des effluents doit être en deçà d'une certaine valeur avant rejet.
8. La chaleur calorifique massique de 4,2 kJ/kg/°C est identique à tous les courants.
9. Le système est supposé fonctionner en permanence.

III.1.1 ETUDE DU SYSTEME : OPTIMISATION DES ECHANGEURS DE CHALEUR

Les données caractéristiques de fonctionnement des installations du site industriel sont mentionnées dans le tableau ci – dessous.

Tableau 3: Données de fonctionnement du système d'eau

Opérations	C _{in} (ppm)	C _{out} (ppm)	T _{op, in} (°C)	T _{op, out} (°C)	Débit actuel (kg/s)	Débit max (kg/s)
Opération 1	0	100	40	40	20	20
Opération 2	50	100	100	100	50	100
Opération 3	50	800	75	75	37.5	40
Opération 4	400	800	50	50	5	10

Sources : Luciana S. et al (2003)

La consommation minimale d'eau de l'ensemble du procédé est de 112,5 kg/s. La répartition des débits d'eau est faite telle qu'indiqué sur la figure (12). L'approvisionnement en eau des opérations est fait à une température de 20°C et son rejet à 30°C.

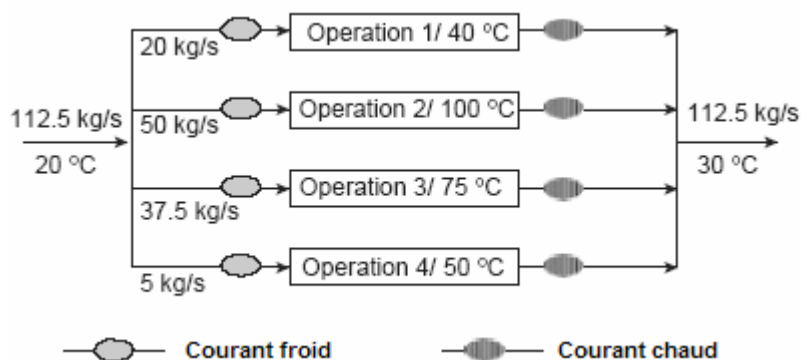


Figure.12 : Répartition des débits des courants

L'objectif visé par l'optimisation des échangeurs de chaleur est de satisfaire la cible minimale de consommation d'eau en maximisant la récupération de l'énergie.

L'analyse pinch appliquée au système présenté ci-dessus montre que le procédé nécessite un besoin minimum en chauffage de 4725 kW pour un ΔT_{min} de 10°C.

Afin de réduire le nombre de courant dans chaque intervalle de température et de simplifier la structure du réseau des échangeurs de chaleur, un mélange isotherme des courants à chaque intervalle de température est réalisé. Le courant obtenu par le mélange de deux autres courants de même température est appelée courant isotherme (figure 13). Le mélange isotherme ne dégrade pas le ΔT_{min} par conséquent les courbes composites et la cible minimale de consommation d'énergie demeurent inchangées (figure 13). La figure (14) présente le réseau d'échangeurs de chaleur avec la mise en oeuvre des courants iso thermiques.

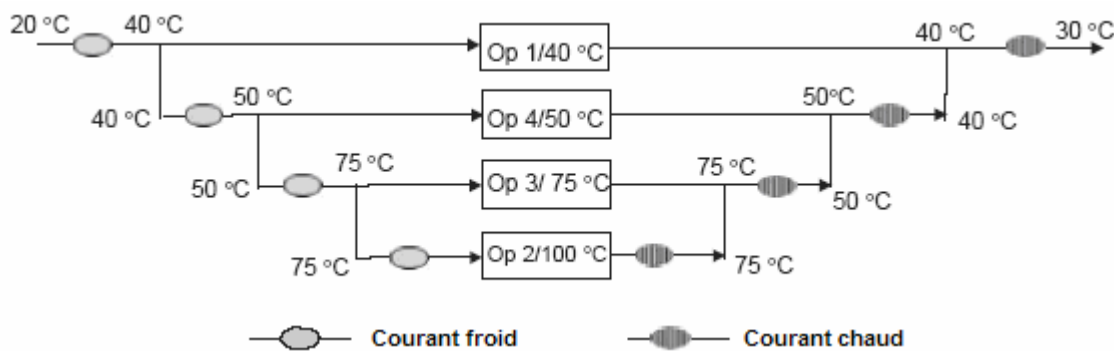


Figure 13 : Génération des courants isothermes

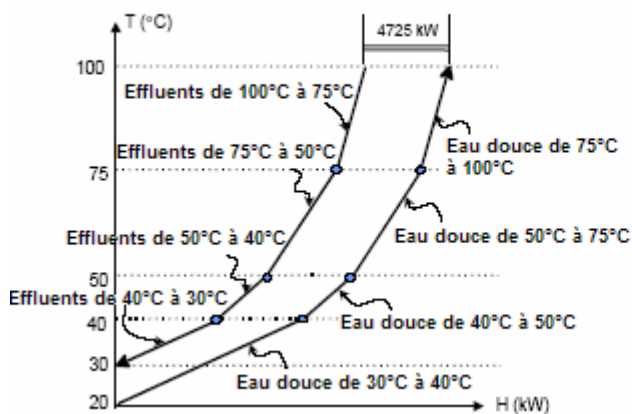


Figure 14 : Courbe Composite avec les courants isothermes.

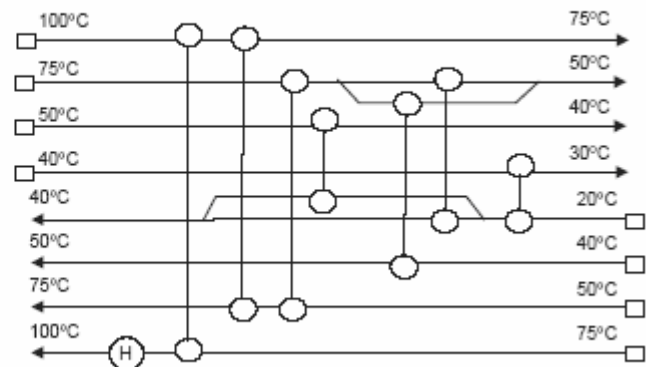


Figure 15 : Diagramme de grille

- **Conception du système**

Comparativement à l'approche conventionnelle, le nombre d'échangeurs de chaleur peut être davantage réduit en créant des systèmes séparés et en introduisant le mélange non isotherme entre les courants chauds et les courants froids.

Les systèmes séparés sont obtenus en fixant l'une des deux courbes composites et en déplaçant verticalement les points de l'autre courbe jusqu'à une limite exacte de ΔT_{min} par rapport à la courbe composite fixe. (Plus facilement : on obtient les systèmes séparés en translatant verticalement l'une des deux courbes composites d'une distance ΔT_{min} par rapport à l'autre courbe). Deux options sont alors identifiables : une première option avec fixation de la CCC puis modification de la CCF et inversement une 2nde avec fixation de la CCF et modification de la CCC.

🌀 **Première Option** : La figure n°1 représente les systèmes séparés avec fixation de la courbe composite chaude (Exemple du mélange isotherme de la figure.12).

La courbe composite finale après séparation de système est donnée par la figure.16.

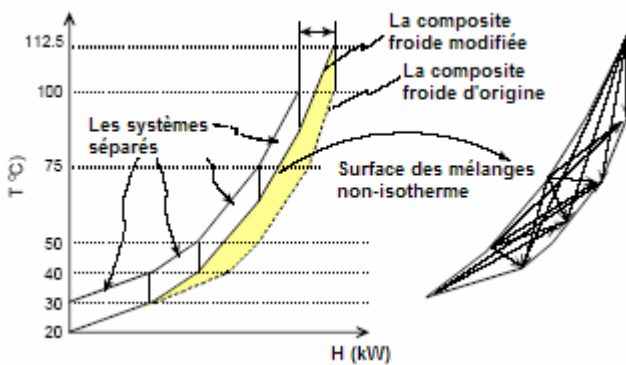


Figure 16. Génération des systèmes séparés

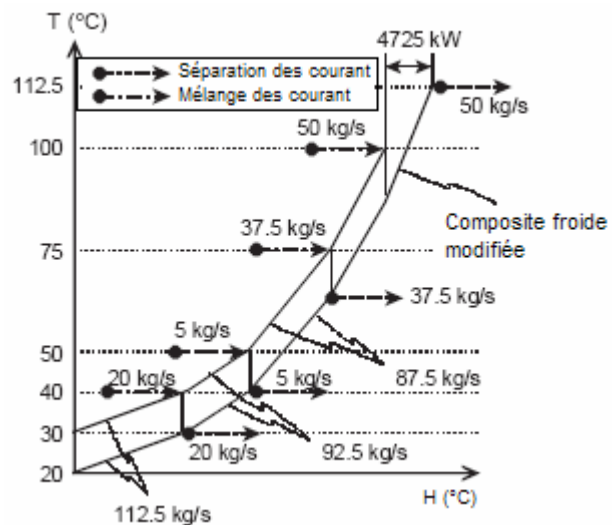


Figure 17 : division et mélange de courants

En plus de la simplification de la structure du réseau d'échangeurs de chaleur, la séparation de système présente le bénéfice d'un transfert de chaleur vertical entre les deux courbes composites avec diminution de la surface d'échange de chaleur.

La création de systèmes séparés engendre des mélanges non isothermes des courants qui peuvent exiger du système, un supplément d'utilités de chauffage ou de refroidissement pour satisfaire les besoins du procédé (Principe de l'analyse Pinch).

Afin de satisfaire la demande en énergie, un supplément de chaleur doit être apporté à la CCF la rehaussant de 100°C à 112,5°C.

Les courants de la CCF modifié sont divisés puis mélangés pour satisfaire aux besoins en énergie des opérations. Les débits sont donc calculés en fonction des exigences en eau et en température des différentes opérations.

La structure finale (figure.18), comparée à la structure obtenue avec les courants isothermes (figure.14) réduit de 8 à 5 le nombre d'échangeurs de chaleur.

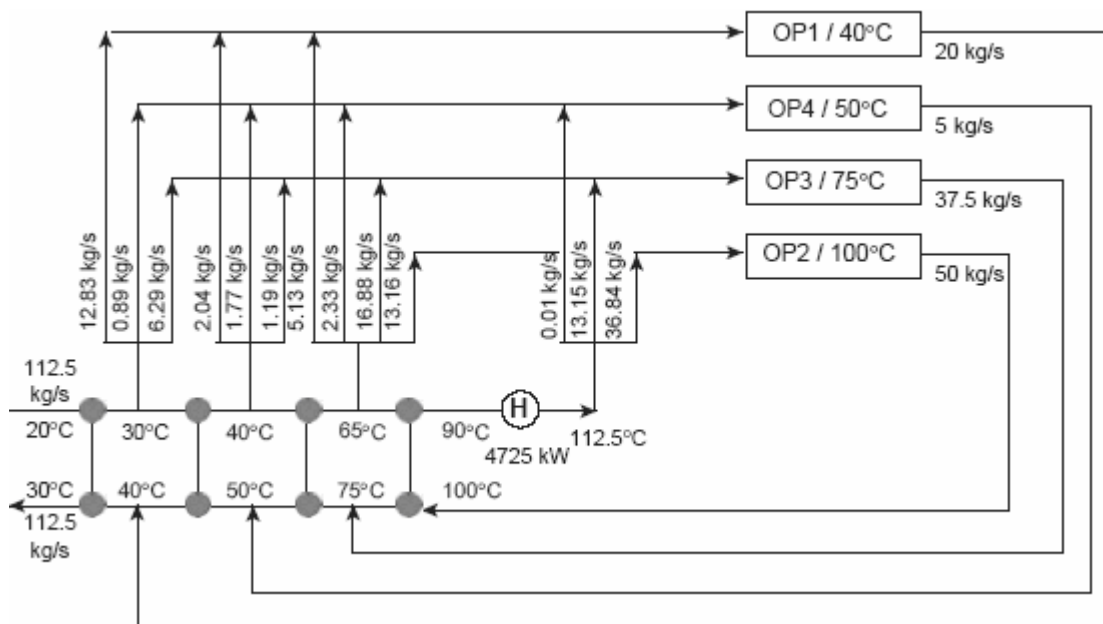


Figure 18 : Structure finale du réseau – première option

Sources : Luciana S. et al (2003)

🔧 **Seconde Option** : Parallèlement à la précédente structure, une autre conception peut être élaborée en adoptant la seconde option de construction des systèmes séparés (fixation de la CCF et modification de la CCC, figure.19). Cette fois la CCC débute non pas à 100°C mais à 87,5°C en compensation aux besoins en chauffage qui doivent être maintenus satisfaits. C'est aussi au tour de la CCC modifiée de générer des courants non isothermes pour satisfaire les exigences en énergie du procédé.

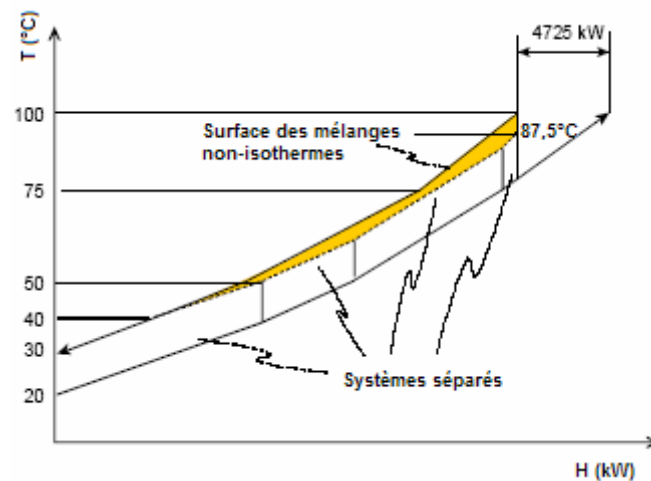


Figure 19 : Systèmes séparés : 2nde alternative

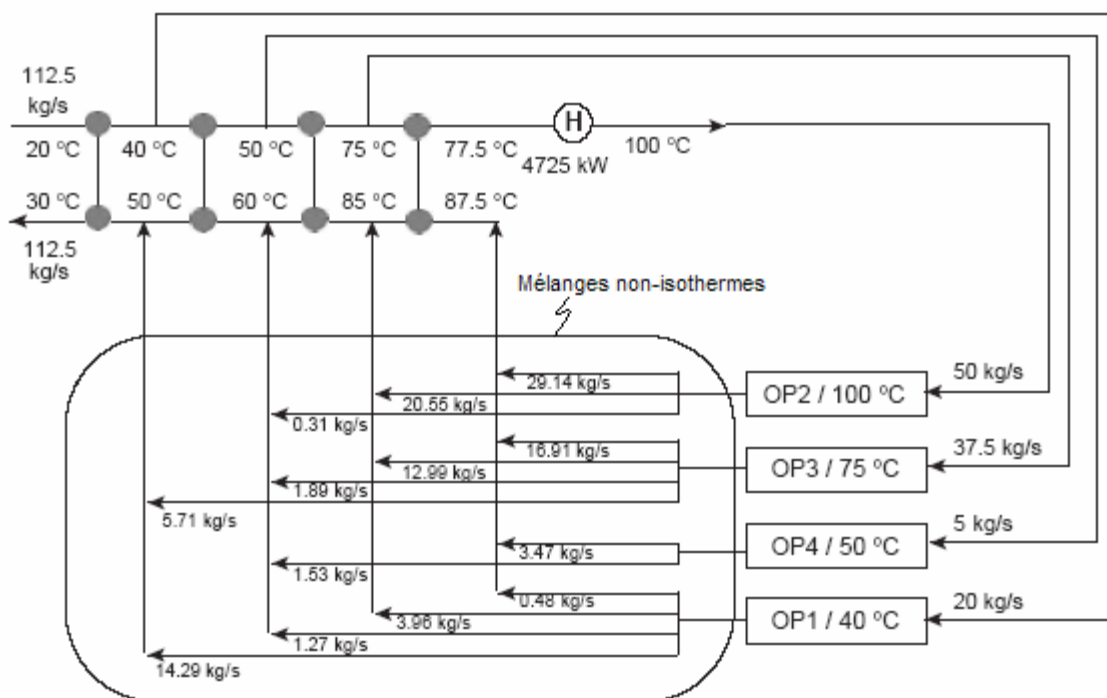


Figure 20 : Structure finale du réseau deuxième option (Sources : Luciana S. et al - 2003)

En définitif :

- La cible de consommation minimale de 112,5 kg/s est atteinte avec simplification et optimisation de la structure de l'ensemble du réseau : le nombre d'échangeurs est passé de 8 à 5.
- Il y a amélioration de l'efficacité énergétique : $U \times A$ (produit du coefficient de transfert de Chaleur et de la surface totale d'échange de chaleur). L'efficacité du nouveau réseau d'échangeurs de chaleur est de 1538,1 kW/°C sur la figure.17 et 1517,1 kW/°C sur la

- figure.19 contre 2099,9 kW/°C avec l'approche conventionnelle de conception (Figure 15).
- Un supplément en utilité est requis à cause du mélange non isotherme

III – 2. SYSTEME AVEC REUTILISATION DES EFFLUENTS

III.2.1. OPTIMISATION DES RESEAUX D'EAU

Plusieurs variantes de réseaux impliquant différents niveaux de consommation d'énergie permettent de réduire la consommation en eau du système par la réutilisation des effluents.

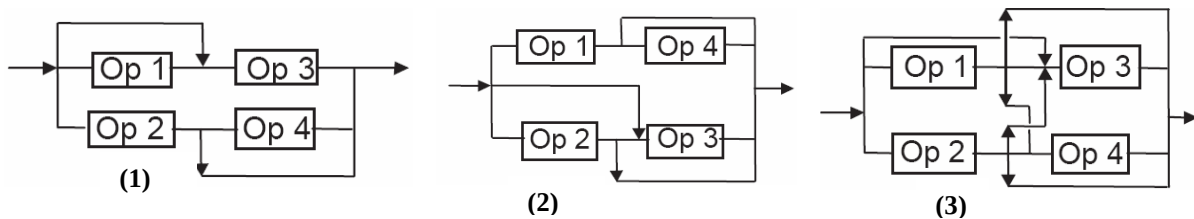


Figure 21 : Exemples de tracés du réseau avec réutilisation d'eau

Une seule matière étant considérée à la fois, les seules contraintes d'interconnexion des circuits du réseau résident au niveau de la concentration en contaminants des différents courants. Un courant d'eau d'une certaine concentration en contaminants n'est réutilisable que pour alimenter une opération d'exigence moindre en contaminants (figure.22). Ce qui exclut la possibilité de réutilisation des effluents de l'opération (3) dans (4) et vice versa. Il en est de même pour les effluents des opérations (1) et (2).

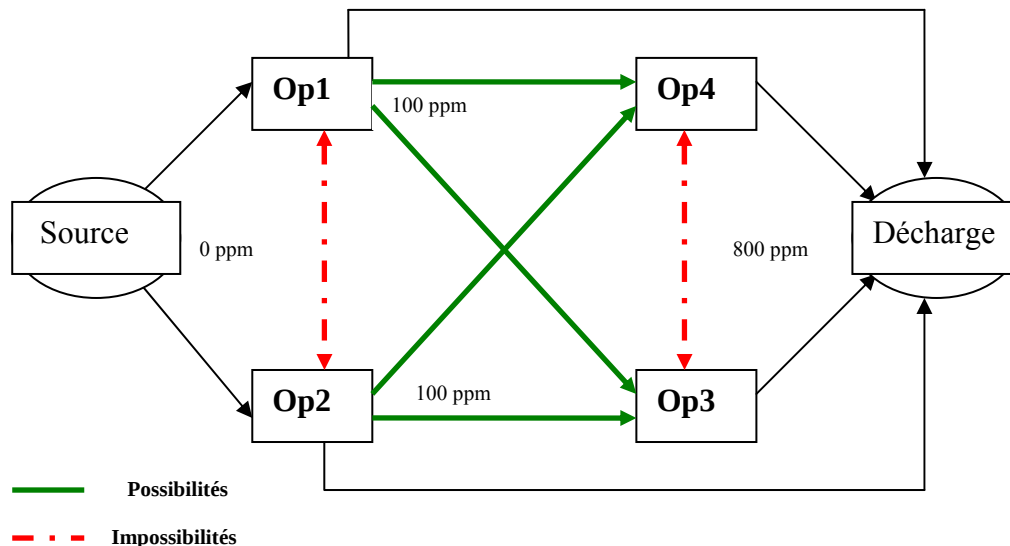


Figure 22 : Contraintes en contaminants et possibilités de réutilisation d'eau

Près de 20% de la demande en eau initiale (112,5 kg/s) peuvent être réduites à travers les différentes combinaisons. La nouvelle demande en eau est ramenée à 90 kg/s (figure.23).

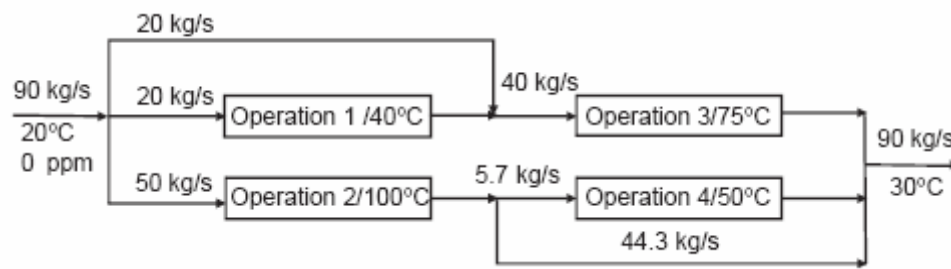


Figure. 23 : Répartition de la demande en eau sur la variante (1)

III.2.2 OPTIMISATION SIMULTANEE DU SYSTEME D'EAU ET D'ENERGIE

Le but de la méthodologie tel qu'énoncé dans la première partie de l'étude reste le même : Identifier le modèle qui réduise le nombre de courants, qui dégrade peu la cible minimale de consommation d'énergie et qui simplifie au maximum la structure du réseau d'échangeurs de chaleur. De la figure (22), découlent plusieurs variantes de réseau. L'analyse cas par cas de l'ensemble des combinaisons possibles (systèmes de réutilisation possibles) s'avère fastidieuse. Afin de simplifier le processus d'identification du réseau optimal, Kuo et Smith (1998) introduisirent un nouvel outil : le diagramme de grille bidimensionnel.

- **Le diagramme bidimensionnel de grille**

Le digramme bidimensionnel de grille est la représentation graphique des différents scénarios de fonctionnement du système, une représentation à deux dimensions (x et y) dont (x) correspond à la concentration en contaminant et (y) à la température du courant.

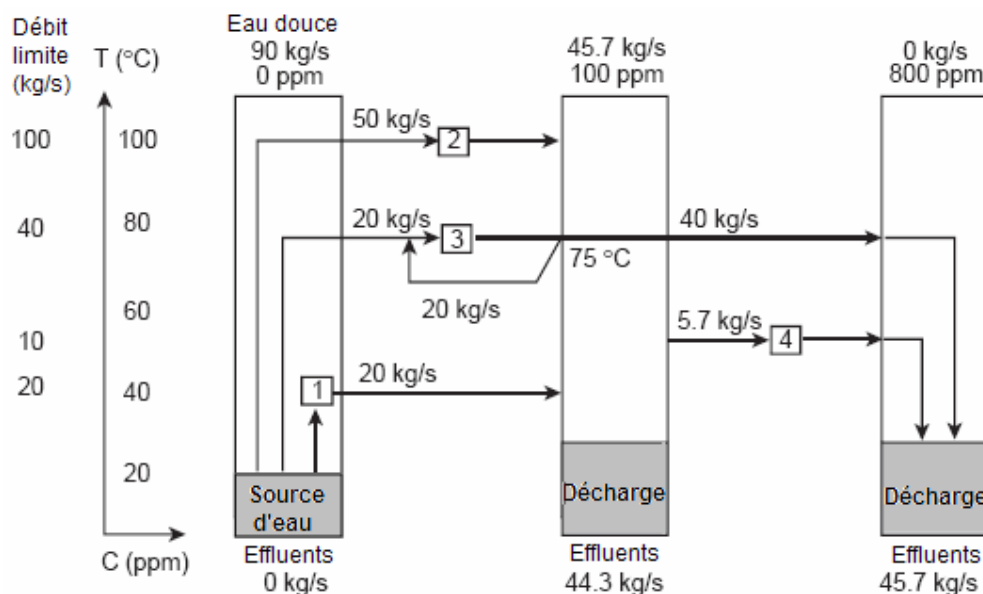


Figure 24 : Diagramme bidimensionnel de grille (Sources : Luciana S. et al - 2003)

Les rectangles représentent les différentes phases d'exécution du procédé. Les opérations sont représentées par des traits horizontaux, tracés à partir de leurs températures respectives.

La figure (24) s'interprète alors aisément. Le procédé se déroule en trois étapes :

- Première étape : La source qui alimente directement en eau propre (0 ppm) les opérations (1), (3) et (2) placés à la hauteur de leur température respective (rectangle 1) ;
- Deuxième étape : Une première décharge a lieu (rectangle 2). Il s'agit des effluents sortant des opérations (1) et (2) à 100 ppm. De cette première décharge, 20 kg/s doivent être prélevés pour satisfaire les exigences de l'opération (3) et 5,7 kg/s à l'endroit de l'opération (4).
- Troisième étape : Les effluents sortants de l'opération (3) et (4) à 800 ppm alimentent à leur tour un second niveau de décharge (rectangle 3).

Les différentes possibilités peuvent être alors étudiées. Examinons quatre d'entre elles sous un angle énergétique :

Cas 1. (Figure 25) : les effluents de l'opération (1) sont réutilisés dans l'opération (3). Ceci nécessite un apport en chauffage de 2940 kW. Comme les effluents de l'opération (1) sont complètement utilisés dans l'opération (3), l'opération (4) sera seulement alimentée par l'opération (2) avec un besoin de refroidissement de 1197 kW. Le débit qui reste de l'opération (2) 44,3 kg/s est rejeté dans la décharge libérant 13.024 kW de chaleur.

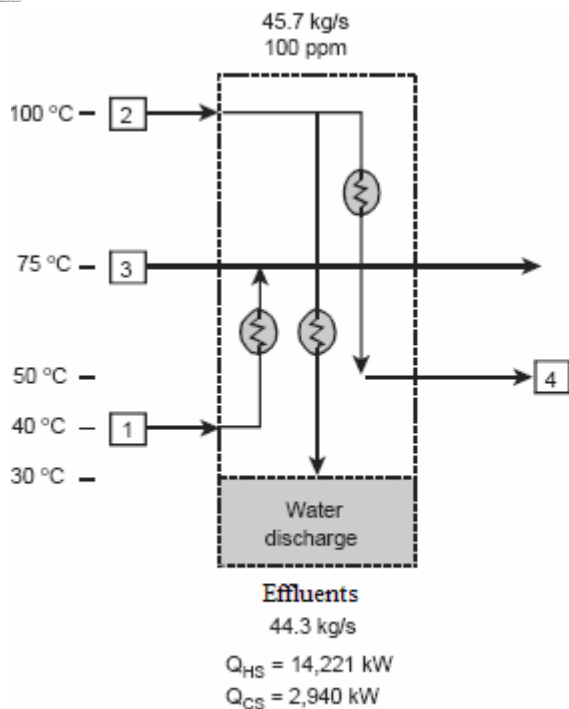


Figure 25: Réutilisation de l'eau. Cas 1

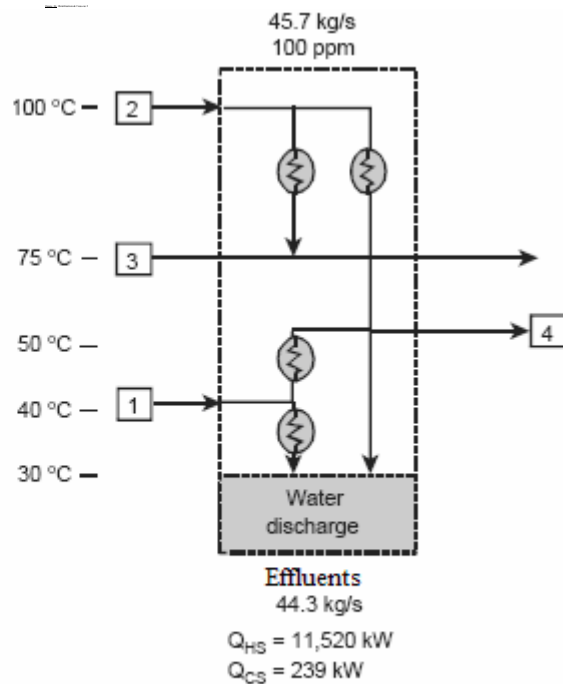


Figure 26: Réutilisation de l'eau. Cas 2

Cas 2. (Figure 26) : Une nouvelle stratégie est de considérer l'inverse de la situation précédente, en connectant entre eux les courants de températures proches. Ainsi le courant sortant de l'opération (1) à 40°C est utilisé pour alimenter l'opération (4) qui se déroule à 50°C. Il s'agit d'un courant froid nécessitant un chauffage de 239 kW. De même le courant chaud sortant de l'opération (2) est utilisé en complément dans l'opération (3) après être refroidi de 2100 kW. Le surplus d'eau de chaque source est dirigé vers la décharge. Le nombre de courant passe à quatre quand bien même que l'énergie libérée par l'ensemble des courants chauds est de 11520 kW et celle exigée par les courants froids de 239 kW, des valeurs tout à fait inférieures à celles du cas précédent.

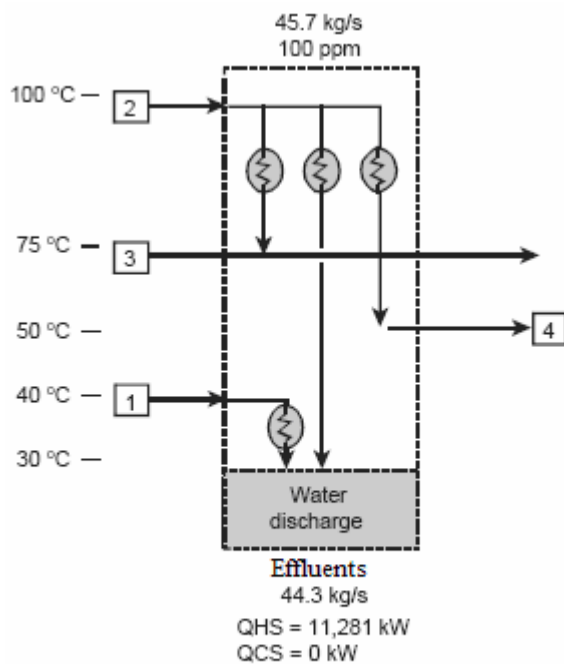


Figure 27: Réutilisation de l'eau: cas.3

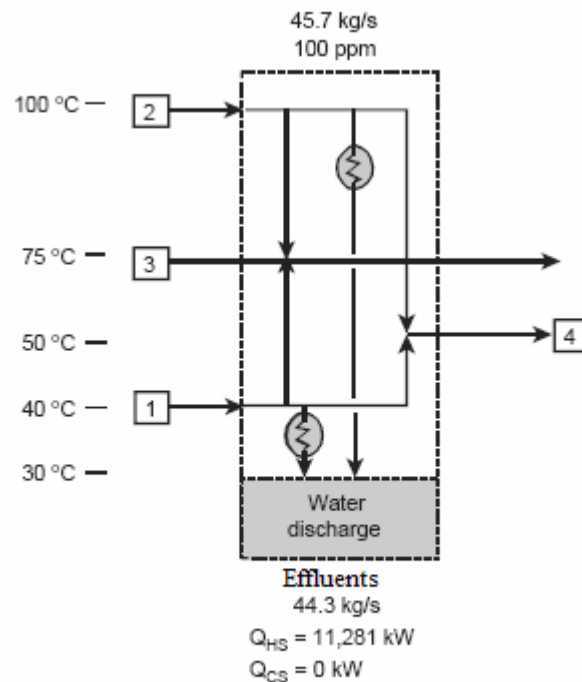


Figure 28: Réutilisation de l'eau: cas 4

Cas 3. (Figure.27). Dans cette possibilité l'on privilégie l'utilisation de la source la plus chaude. Ainsi, les effluents de l'opération (2) sont utilisés dans les opérations (3) et (4) créant conséquemment deux courants chauds. Ces effluents étant largement suffisants pour alimenter les deux opérations, il ne sera fait aucun usage du courant provenant de l'opération (1) qui sera donc entièrement rejeté dans la décharge. De nouveau, quatre courants apparaissent dans le réseau intermédiaire : quatre courants chauds dont deux sont rejetés dans la décharge. Nous remarquons que les courants froids sont absents dans ce cas. L'énergie disponible à travers ces courants chauds est de 11281 kW (en récupération indirecte).

Cas 4. (Figure.28) : Comme la réutilisation se fait à une température intermédiaire à la température de la source et à celle de l'opération en vue, le mélange des courants provenant des opérations (1) et (2) est envisageable (récupération directe d'énergie).

Le mélange non isotherme des deux courants d'eau, n'empêche guère la réutilisation de l'eau. Les conditions de température sont au contraire améliorées et les exigences de concentration en contaminants restent satisfaites. Le débit restant est conduit à la décharge par deux courants chauds libérant 11281kW (en récupération indirecte).

Pour ce qui concerne la minimisation simultanée d'énergie et de l'eau, en conclusion nous retenons la règle de conception suivante:

- 1 – réutiliser d'abord l'effluent le plus chaud ;
- 2 - connecter un courant au plus proche point de réutilisation en terme de température ;
- 3 – introduire le mélange non isotherme si la température des effluents est intermédiaire à la température de la source et à celle de sa réutilisation.

La conception complète du système après le choix de la variante optimale, passe par la détermination du nombre minimale d'échangeurs de chaleur ainsi que leur disposition dans le réseau afin d'assurer le transfert du potentiel de chaleur disponible.

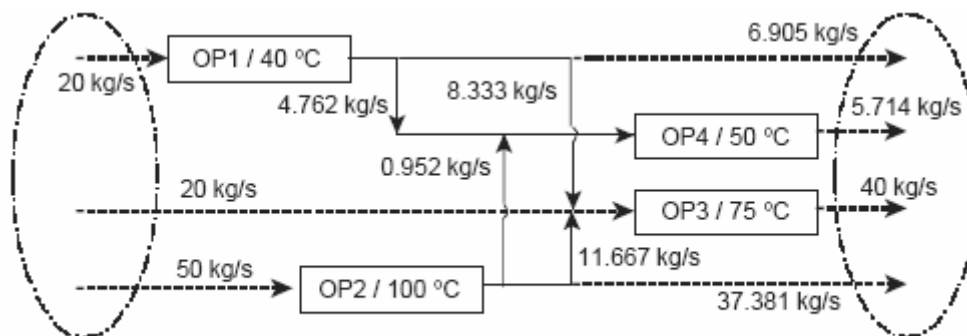


Figure 29: Cas 4. Schemas du réseau

- **Les systèmes séparés.**

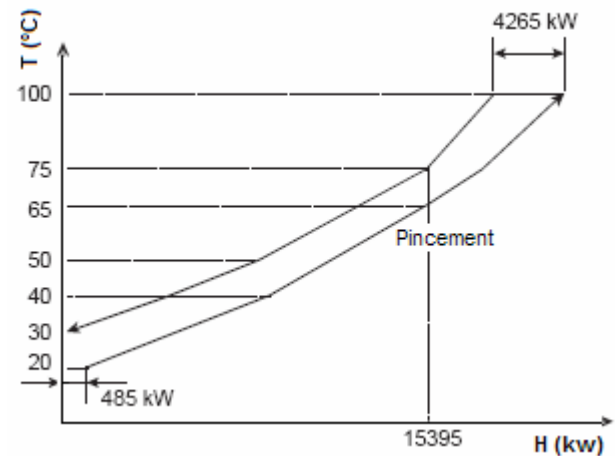
Les systèmes séparés nous permettent de réduire le nombre d'unités d'échangeurs de chaleur. Le système complet sera conçu pour le cas (4). Ce cas est choisi à cause du nombre réduit de courants d'une part et d'autre part à cause du mélange non isotherme des effluents qui permet une récupération directe de l'énergie.

Les courbes composites avec un ΔT_{min} de 10°C ont été générées à partir des données du tableau ci - dessous. Le pincement est réalisé à 75°C sur la CC et 65°C sur la CF

Tableau (4) : Données caractéristiques du cas 4

Courants	m (kg/s)	Ts (°C)	Tt (°C)	Cp kW/°C	ΔH (kW)
Eau douce pour l'OP.1	20	20	40	84	1680
Eau douce pour l'OP.2	50	20	100	210	16800
Eau douce pour l'OP.3	20	20	75	84	4620
Réutilisation des Effluent de OP.1 à OP.3	20	40	75	84	2940
Réutilisation des Effluent de OP.2 à OP.4	5.7	100	50	23.94	1197
Effluents de OP.2	44.3	100	30	186.06	13024
Effluents de OP.3	40	75	30	168	7560
Effluents de OP.4	5.7	50	30	23.94	478.8

Figure 30 : Courbe composite



La nouvelle demande en utilité de chauffage est de 4265 kW et le besoin en refroidissement est de 485 kW.

Dans le cas où il existe un point de pincement, les systèmes séparés peuvent être générés en fixant indifféremment de part et d'autre du point de pincement l'une des courbes composites et en décalant l'autre courbe composite selon l'écart de ΔT_{min} .

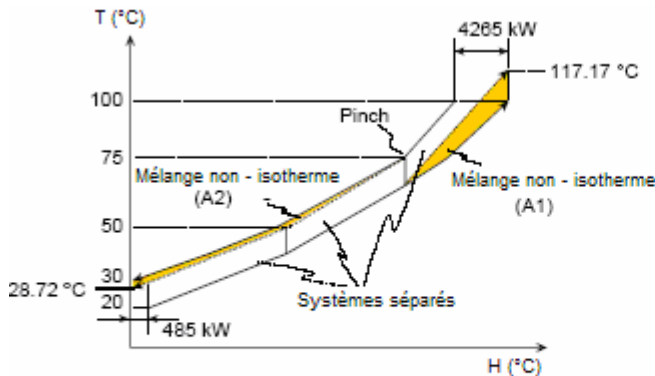


Figure 31: Génération des systèmes séparés

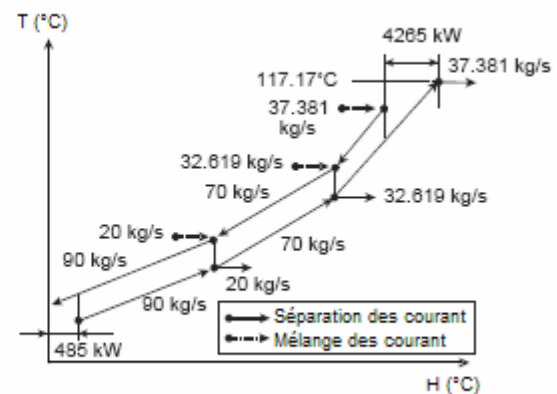


Figure 32: Séparation et mélange des courants

La figure (31) représente la génération des systèmes séparés lorsque la composite froide est fixée au dessus du point de pincement et la composite chaude en dessous du point de pincement. La courbe composite froide au dessus du point de pincement est décalée jusqu'à 117,17°C tandis que la courbe composite chaude en dessous du point de pincement descend à 28,72°C. Deux surfaces de mélange non- isotherme sont créées (A1 et A2). Les partages et les mélanges appropriés des courants d'eau sont obtenus à partir des courbes composites modifiées (figure 31).

La conception finale du réseau est donnée par la figure. 33. L'on retient en définitive 5 échangeurs de chaleur.

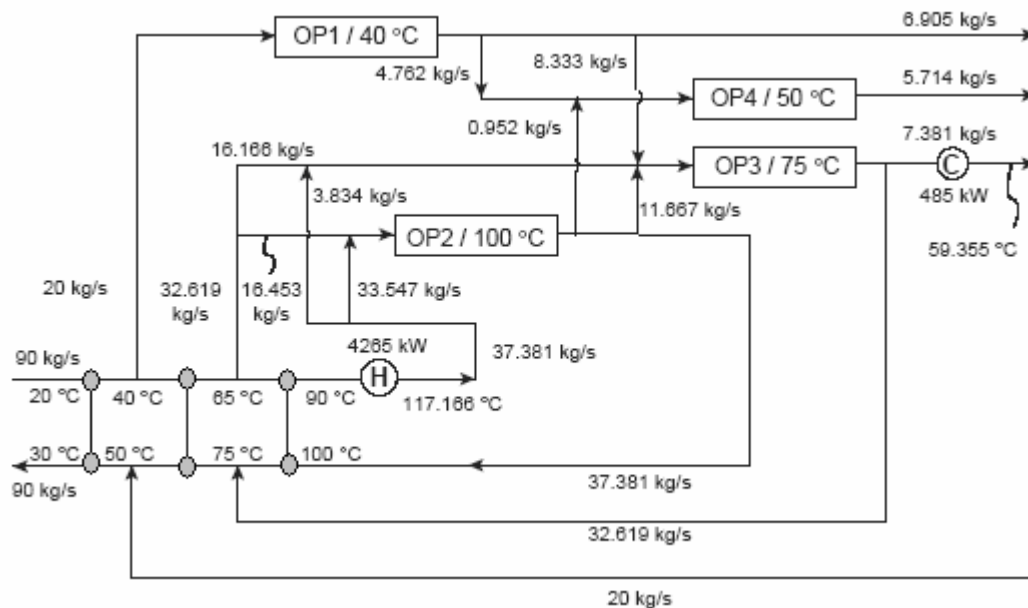


Figure 33 : Structure finale du réseau avec réutilisation d'eau (Sources : Luciana S. et al - 2003)

Succinctement, la nouvelle méthodologie d'optimisation simultanée des réseaux d'eau et des échangeurs de chaleur se résume par les étapes suivantes :

1. Détermination de la cible minimale de consommation d'eau.

Cette détermination passe par l'analyse de toutes les possibilités de réutilisation d'eau intégrant les contraintes en concentration des contaminants et les exigences en température des différentes opérations.

2. Le diagramme bidimensionnel de grille.

L'utilisation du diagramme bidimensionnel de grille permet de déterminer la structure optimale du réseau d'eau permettant d'atteindre cette minimale et présentant une bonne opportunité de réduction de la consommation d'énergie.

3. l'analyse pinch

L'analyse pinch est réalisée selon la méthode traditionnelle présentée dans la première partie du document. Elle détermine la cible minimale de consommation d'énergie.

4. Les systèmes séparés.

Les systèmes séparés permettent de réduire la surface d'échange de chaleur déterminée par la méthode conventionnelle de l'analyse pinch. Elles sont introduites pour optimiser les échangeurs de chaleur et de simplifier la structure finale du réseau.

5. Conception finale du système : Avec intégration de toutes les modifications

IV. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Parmi les méthodes d'IP, la technologie pinch est remarquablement la plus notoire. Son application s'est avérée efficace dans les **installations industrielles de grande envergure (Grande consommation d'eau et d'énergie)** telles que les industries de pétrole, les industries agroalimentaires, les pâtes et papiers, le domaine de textile et polymère, la sidérurgie etc. Ces industries se distinguent par une consommation énergétique élevée (vapeur, huile, gaz), un réseau d'eau et d'énergie complexe, une consommation d'eau colossale induisant dans bien des cas d'énormes coûts de traitement des eaux usées.

La technologie pinch offre un aperçu clair de toute l'installation à travers une structure simplifiée du réseau qu'elle propose. La minimisation de l'eau et de l'énergie engendre des économies spectaculaires pouvant atteindre jusqu'à 40% de réduction en terme de consommation.

Face aux contraintes environnementales et à la pression énergétique de plus en plus fortes, le domaine de l'IP et particulièrement le développement et l'extension de la technologie pinch est loin d'avoir atteint son essor.

Loin de l'industrie, Cette méthodologie doit s'imposer à cause de sa pertinence dans les programmes de formation des écoles d'Eau et d'Energie. Le document réalisé dans le cadre de ce mémoire de fin d'étude n'est qu'une entrée en matière dans le vaste domaine de l'IP. Les travaux à venir doivent approfondir substantiellement certains points abordés ici de façon superficielle tels que :

- la technologie pinch appliquée dans le retrofit (installations existantes)
- la technologie pinch appliquée purement à l'eau : tracée des courbes composites et détermination des cibles de consommation minimale d'eau ;

Un stage pratique avait été prévu à la BRAKINA, cité initialement pour modèle d'application. Stage qui malheureusement n'eut pas lieu à cause de la non disponibilité des personnes ressources de l'usine mais aussi et surtout à cause de l'immensité des contours du sujet qu'il faille réunir et cerner dans le laps de temps accordé pour le mémoire. Toutefois un cas pratique d'application et l'acquisition d'un logiciel de l'analyse pinch restent un impératif pour la prise en main et la maîtrise de la technologie.

V. BIBLIOGRAPHIE

Ouvrages et articles

- Russell F. Dune, Greg E. Bush (2000), Using process integration technology for CLEANER production, *journal of Cleaner production* 9 (2001), 1-23
- Valarie Ku-Pineda, Raymond R. Tan, (2004), Environmental performance optimisation using process water integration and Sustainable Process Index, *journal of cleaner production*, 14(2006) 1586-1592
- Y. L. Tan, Z. A. Manan and D. C. Y. Foo, (2007), Retrofit of water network with regeneration using Water Pinch. *Trans IChemE, PartB, Process Safety and Environmental Protection*, 2007, 85(B4): 305 – 317
- Detchasit Prakotpol, Thongchai Srinophakun, (2003), GAPinch: genetic algorithm toolbox for water pinch technology, *Chemical Engineering and Processing* 43 (2004) 2003-217
- L. Tantimuratha, A. C. KoKossi, F. U. Müller, (2000), The heat exchanger network design as a paradigm of technology integration, *Applied Thermal Engineering* 20 (2000) 1589-1605
- Mubarak Ebrahim, Al-Kawari, (1999), Pinch technology, an efficient tool for chemical plant, Energy and capital-cost saving, *applied energy* 65(2000) 45-49
- Luciana Savulescu, Jin-Ku Kim, Robin Smith, (2003), Studies on simultaneous energy and water minimisation – Part I: systems with no water re-use, 60(2005) 3279-3290
- Luciana Savulescu, Jin-Ku Kim, Robin Smith, (2003), Studies on simultaneous energy and water minimisation – Part II: systems with maximum re-use of water, 60(2005) 3291-3308
- L. Matijaseviæ, H. Otmaëiæ, (2001), Energy recovery by pinch technology, *Applied Thermal Engineering* 22(2002) 477- 484
- Toshko K, Zhelev, (2005), Water conservation through energy management, *journal of cleaner production*, 13(2005) 1395 - 10404

Sites internet

Linnhoff March, Introduction to pinch technology, www.Linnhoffmarch.com

The Chemical Engineers resources page, Pinch technology: basic for the beginners
www.cheressource.com

Centre de la technologie de l'énergie de CANMET – Varenne, l'analyse pinch pour l'utilisation efficace de l'énergie, de l'eau et de l'hydrogène, www.ctec-varennescan.gc.ca

Centre de la technologie de l'énergie de CANMET – Varenne, L'analyse pinch pour l'utilisation efficace de l'énergie, de l'eau et de l'hydrogène : Industries de pâtes et papiers, récupération d'énergie et refroidissement des effluents www.ctec-varennescan.gc.ca

Résumé

L'intégration des procédés est un ensemble de méthodologies visant à répondre aux problématiques industrielles articulées autour de l'économie de l'énergie et de l'eau associée au respect des normes environnementales de plus en plus contraignantes. Parmi les méthodes d'IP la technologie pinch est la plus répandue tant à cause de sa simplicité qu'à cause des succès enregistrés dans ses multiples cas d'application. Initialement développée dans le domaine de l'énergie, la technologie pinch connu plutard un extension remarquable dans le domaine de l'eau et de toute autre matière utilisée intensément dans l'industrie. Une méthode d'analyse plus graphique qu'analytique, la technologie pinch utilise des courbes dites composites pour dégager des cibles de consommation minimale d'énergie et proposer une structure simplifiée des installations industrielles existantes ou en cours de conception.

La minimisation simultanée de la consommation d'eau et d'énergie est une nouvelle méthodologie permettant de réduire consommation de l'eau et de l'énergie à travers l'optimisation des réseaux et d'échangeurs de chaleurs des installations industrielles.

Mots Clés : Intégration des procédés, Technologie pinch, Courbes composites, Cible minimale de consommation d'énergie, Optimisation des réseaux d'eau et d'échangeur de chaleur

SUMMARY:

Process integration (PI) is a methodology to answer the industrial problem concerned with saving energy and water (associated to the respect of environmental rule that become more and more strict). Among the PI methods, pinch technology is the most employed because of its simplicity and the success rate realized in many cases applied through the world. Developed first in energy domain, pinch technology has now been extended to the domain of water and mass exchange network. Pinch technology is a graphical method which uses curves designed by composites curves that permit energy and economy targeting. The final result of pinch analysis is the simplification of total site by retrofitting or new design.

The simultaneous minimisation of energy and water is a new methodology that allows energy and water minimisation through water network and heat exchanger network optimisation.

Key words: Process integration, Pinch technology, Composites curves, Energy and capital targeting, Heat exchanger network and water network optimization