

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE HASSIBA BEN BOUALI DE CHLEF**

**FACULTE DES SCIENCES ET SCIENCES DE L'INGENIEUR
DEPARTEMENT DE GENIE DES PROCEDES**

MEMOIRE DE MAGISTER

**Spécialité : GENIE DES PROCEDES
Option : GENIE CHIMIQUE**

Présenté par

LAKRIDER HAMIDA Karima

Ingénieur en génie chimique

THEME

**CONCEPTION D'UN RESEAU D'ECHANGEURS DE
CHALEUR OPTIMAL – APPROCHE EXERGETIQUE**

Soutenu le 29/04/2010 devant le jury composé de :

- Mlle KOUADRI MOSTEFAL. S	M.C.A, UHB Chlef	Présidente
- ACHOUR Djillali	Professeur à UHB Chlef	Examineur
- Mr DABBAB Abdelkader	Maître de conférences, Université d'Oran	Examineur
- Mr LABBACI Abdallah	M.C.A, UHB Chlef	Examineur
- Mr DOUANI Mustapha	M.C.A, UHB Chlef	Encadreur

Remerciements

C'est avec l'aide de Dieu que le présent travail est achevé. L'aboutissement de ce mémoire est une grande satisfaction. C'est donc avec un immense plaisir que j'exprime mes profondes gratitudee aux quelques personnes qui ont contribué, directement ou indirectement, à la réussite de ce travail dont les conseils et les encouragements ont été précieux durant sa réalisation.

Je tiens à exprimer toute ma profonde gratitude à Monsieur M. Douani pour m'avoir guidé et orienté durant la réalisation de ce travail.

Nous remercions tout particulièrement les membres du jury, Melle S. kouadri Mostefai, Mr A. LABBACI, Mr Dj. ACHOUR et Mr Aek. DABBAB pour avoir accepté de participer au jury pour juger le contenu de cet humble travail.

Je tiens à remercier et à exprimer mes profondes reconnaissances à nos professeurs :

Monsieur ABDI, DENAI, BEN SEBIA, DJAFER, MAHMOUDI,
OUAGUED, MOUDJEBER, Mme HANINI.

Je voudrais remercier tous les enseignants et enseignantes que j'ai connus tout au long du cycle de mes études.

Enfin, je remercie ma famille et mes amis qui m'ont soutenu pendant la réalisation de ce mémoire.

Dédicaces

Je dédie le présent travail à la mémoire de mes parents.

Karima Lakrider
Karima Lakrider

Table des matières

Remerciements.....	I
Dédicaces	II
Symboles.....	III
Liste des figures	V
Liste des tableaux.....	VIII
Introduction générale	1

CHAPITRE I : LES METHODES DE SYNTHESE DES RESEAUX

D'ECHANGEURS DE CHALEUR

I.1. Introduction	3
I.2. Méthodes de synthèse d'un réseau d'échangeurs de chaleur	4
I.2.1. Notion du pincement de température (Pinch analysis)	5
I.2.2. Programmation mathématique	17
I.2.2.1 Approches séquentielles	17
I.2.2.2 Approches simultanées	19
I.2.3. Méthodes d'optimisation pour la résolution des problèmes MINLP..	23
I.2.3.1. Méthodes déterministes	24
I.2.3.2. Méthodes Stochastiques	24
I.2.3.3 Démarche hybride.....	25

CHAPITRE II : ANALYSE DU FONCTIONNEMENT D'UN ECHANGEUR DE CHALEUR

II.1. Introduction.....	30
II.2. Principaux types d'échangeurs de chaleur.....	30
II.3. Configurations géométriques	31
II.3.1. Echangeurs tubulaires coaxiaux	31
II.3.2. Echangeurs à faisceaux complexes	32
II.3.3. Echangeurs à courants croisés.....	33
II.3.4. Echangeurs à plaques	33
II.4. Méthodes de calcul des échangeurs de chaleur.....	34
II.4.1. Méthode de la moyenne logarithmique de différence de température (MLDT).....	34
II.4.2. Méthode du nombre d'unités de transfert (NUT)	38

CHAPITRE III : APPLICATION DU CONCEPT DE L'EXERGIE A L'ANALYSE DU FONCTIONNEMENT D'UN ECHANGEUR DE CHALEUR

III.1. Introduction.....	40
III.2. Principe du calcul exergetique	40
III.2.1. Définition de l'exergie	40
III.2.2. Définition de l'état ambiant	41
III.3. Calcul de l'exergie d'un courant de matière	41
III.3.1. Définition des composantes de l'exergie	41
III.3.2. Bilan exergetique sur un volume de controle.....	45
III.4. Calcul des irréversibilités dans un échangeur de chaleur.....	46

**CHAPITRE IV: MODELISATION ET SYNTHESE D'UN RESEAU
D'ECHANGEURS DE CHALEUR SUR LA BASE DU CONCEPT
DE L'EXERGIE**

IV.1. Modélisation d'un échangeur de chaleur.....	55
IV.1.1. Equations du modèle.....	55
IV.2 Concept du degré de liberté appliqué à un échangeur de chaleur.....	58
IV.2.1 Application pour un échangeur de chaleur	59
IV.2.2 Spécification de variables	60
IV.3. Synthèse d'un réseau d'échangeurs de chaleur sur la base du concept de l'exergie	60
IV.3.1. Formulation du problème d'optimisation	61
IV.4. Choix optimal de la source d'énergie	61
IV.4.1 Optimisation thermodynamique	62
IV.4. 2. Optimisation économique	66
IV.5. Application au calcul du réseau d'échangeurs de chaleur optimal.....	66
IV. 5. 1. Exemple d'application de l'analyse exergetique	67
IV. 5.2. Diagramme de contenu enthalpique (H.C.D)	68
IV. 6. Comparaison des méthodes de conception de réseau	69
IV. 6. 1. Comparaison entre la MINLP et la méthode exergetique	69
IV. 6. 1. 1. Première configuration	70
IV. 6. 1. 2. Deuxième configuration	72
Conclusion générale	75
Annexe 01.....	
Bibliographie.....	

Symboles

Symboles	Signification	Unités
T	Température	K ou °C
A	Surface d'échange	m ²
U	Coefficient global d'échange	kW.m ⁻² .K ⁻¹
Q_t	Flux de chaleur échangée	kW
$\dot{m}.C_p$	Débit calorifique	kW.K ⁻¹
$(\Delta T)_{ln}$	Moyenne logarithmique de la différence de température	
f_1	La fonction objectif : la dissipation d'énergie	kW
f_2	La fonction objectif : la surface d'échange	m ²
I	Irréversibilité	kW
N_v	Nombre des variables.	//
N_E	Nombre d'équations indépendantes	//
N_D	Nombre de degré de liberté	//
Ex	Exergie	kW
T_0	Température de référence = 298.15 K=25 °C	K ou °C
ρ	La masse volumique	Kg.m ⁻³
V_m	Le volume spécifique	m ³ .Kg ⁻¹
V_0	La vitesse relative du courant fluide par rapport à la surface de la terre	[m/s]
J	La matrice Jacobienne	//

J^{-1}	L'inverse de la matrice Jacobienne	//
W	Travail mécanique	kW
g_1 et g_2	Les contraintes	K

▪ **Lettres grecques :**

η : Efficacité .

ε : Epsilon.

Ψ : Efficacité exergétique rationnelle

θ : Facteur de Carnot.

▪ **Indices et Exposant**

Symbole	Signification
C	Chaud
f	Froid
1	Entrée
2	Sortie
J	Nombre de l'échangeur
0	Milieu ambiant
r	Réservoirs d'énergie thermique

Liste des figures

<i>Figure I. 1 : Classification des méthodes de synthèse d'un réseau d'échangeurs de chaleur</i>	<i>4</i>
<i>Figure I.2 : Schéma d'un procédé simple</i>	<i>6</i>
<i>Figure I.3 (a) : Les profils de température des courants chauds (côté gauche) et courants froids (côté droite) pour un processus simple ...</i>	<i>7</i>
<i>Figure I.3 (b) : La courbe composée pour les courants chauds (côté gauche) et les courants froids (côté droite) pour un processus simple.....</i>	<i>8</i>
<i>Figure I.4 : La courbe composée combiné</i>	<i>8</i>
<i>Figure I. 5 : Localisation graphique du point du pincemet</i>	<i>12</i>
<i>Figure I. 6 : Dégradation des sources d'énergie</i>	<i>13</i>
<i>Figure I. 7 : Courbe composite pour un système de courants à coupler thermiquemen.....</i>	<i>14</i>
<i>Figure I. 8: Schéma d'un réseau d'échangeurs de chaleur simple.....</i>	<i>15</i>
<i>Figure I. 9(a) : Diagramme de contenu de chaleur (Heat content diagramm)</i>	<i>16</i>
<i>Figure I. 9 (b) : Calcul de la quantité de chaleur sur le diagramme de contenu de chaleur... ..</i>	<i>17</i>

<i>Figure I.10 : Classification des problèmes d'optimisation selon les critères "fonction linéaire" et "variable discrète".....</i>	<i>21</i>
<i>Figure I.11 : Méthodes classiques de résolution de problèmes MINLP.....</i>	<i>23</i>
<i>Figure I.12 : Schéma de fonctionnement de la démarche hybride.....</i>	<i>26</i>
<i>Figure I.13 : Couplage de colonnes de distillation pour mélanges complexes.....</i>	<i>28</i>
<i>Figure II. 1: Echangeur de chaleur à co-courant</i>	<i>31</i>
<i>Figure II. 2 : Echangeur de chaleur à contre-courant.....</i>	<i>32</i>
<i>Figure II. 3: Schéma d'un échangeur 1-2.....</i>	<i>32</i>
<i>Figure II. 4 : Schéma d'un échangeur 2-4.....</i>	<i>33</i>
<i>Figure II. 5 : Schéma de deux types d'échangeurs à courants croisés.....</i>	<i>33</i>
<i>Figure II. 6 : Schéma d'un échangeur à plaques.....</i>	<i>34</i>
<i>Figure II.7 : Schéma d'un échangeur de chaleur à co-courant et calcul du (MLDT).....</i>	<i>36</i>
<i>Figure II. 8: Schéma d'un échangeur de chaleur à contre courant et calcul du (MLDT)</i>	<i>36</i>
<i>FigureII.9: Profil des températures dans un échangeur tubulaire fonctionnant à contre courant.....</i>	<i>37</i>
<i>Figure III. 1 : L'évolution d'un système de son état initial à l'état d'équilibre avec le milieu ambiant.....</i>	<i>44</i>
<i>Figure III. 2 : Variation du flux d'énergie, d'exergie et d'entropie dans un système</i>	<i>45</i>

<i>Figure III.3 : Représentation des différents flux de'exergies.....</i>	<i>46</i>
<i>Figure III .4: Schéma de l'installation expérimentale.....</i>	<i>49</i>
<i>Figure III .5 : Schéma d'un système pompe à chaleur assisté par un capteur solaire</i>	<i>51</i>
<i>Figure III.6 : Photographies des composants construits de système</i>	<i>52</i>
<i>Figure IV. 1 : Schéma d'échangeur de chaleur à contre courant.....</i>	<i>55</i>
<i>Figure IV. 2 : Les courants chaud et froid dans un échangeur de chaleur à contre courant</i>	<i>59</i>
<i>Figure IV. 3: Organigramme de calcul de la surface d'échange pour un réseau... </i>	<i>65</i>
<i>Figure IV. 4: Réseau d'échangeurs de chaleur simple</i>	<i>67</i>
<i>Figure IV.5 : Diagramme de contenu enthalpique</i>	<i>68</i>
<i>Figure IV.6 : La configuration du réseau d'échangeur de chaleur</i>	<i>69</i>
<i>Figure IV.7 : Schéma d'une configuration du réseau.....</i>	<i>70</i>
<i>Figure IV.8 : Schéma d'une configuration du réseau en absence de division des courants</i>	<i>72</i>

Liste des tableaux

<i>Tableau I.1</i> : Données thermique d'un procédé de chauffage	09
<i>Tableau I.2</i> : Tableau récapitulatif des résultats du couplage des courant.....	11
<i>Tableau III.1</i> : Efficacités énergétique et exergetique des systèmes de GCHP.....	49
<i>Tableau III.2</i> : Les équations des bilans de masse, d'énergie et d'exergie	53
<i>Tableau IV.1</i> : Données thermiques du problème.....	67
<i>Tableau IV.2</i> : Données du problème de Grossmann et Yee... ..	70
<i>Tableau IV.3</i> : Les résultats de la méthode MINLP	71
<i>Tableau IV.4</i> : Les résultats de la méthode exergetique	71
<i>Tableau IV.5</i> : Comparaison entre les résultats des méthodes MINLP et exergetique...	72
<i>Tableau IV.6</i> : La méthode MINLP	73
<i>Tableau IV.7</i> : La méthode exergetique	73
<i>Tableau IV.8</i> : Comparaison entre les résultats des méthodes MINLP et exergetique...	74

Introduction générale

Introduction

L'énergie est fondamentale à l'économie des pays industrialisés mais les possibilités d'en réduire la consommation pour augmenter la rentabilité d'un procédé sont encore trop peu exploitées. Les récents évènements tels que la déréglementation des marchés de l'énergie, l'augmentation des prix du pétrole et du gaz naturel ainsi que les changements climatiques provoqués par les rejets de combustion (le dioxyde de carbone -CO₂- est un gaz à effet de serre), sont autant de raisons pour accorder plus d'importance à une gestion efficace de l'énergie.

Dans les sites industriels, l'amélioration de la rentabilité par la consommation judicieuse de l'énergie, d'eau et de matières premières, doit impliquer la réduction des émissions de gaz à effet de serre et la quantité des rejets thermiques. Il est possible d'exploiter les sources d'énergies par le couplage des courants de différents niveaux énergétiques (utilités) en utilisant les réseaux échangeurs de chaleur.

C'est dans cet objectif que nous sommes penchés sur le problème de l'analyse de la synthèse optimale d'un réseau d'échangeurs de chaleur en exploitant le concept de l'exergie.

Dans le premier chapitre, on abordera les différentes méthodes de synthèse de réseau d'échangeurs de chaleur (REC) qui ont fait l'objet de récents travaux de recherches.

En effet, ces méthodes diffèrent par leurs approches heuristiques ou mathématiques. Elles ont fait abstraction du besoin du recours à la préservation des ressources potentielles d'énergie par l'entremise du concept de la dégradation de qualité de l'énergie soit l'exergie.

Il est tout à fait logique que le fonctionnement d'un échangeur de chaleur impose à cette étape, la mise en évidence des effets de l'interaction des différentes grandeurs (la température T, débits, la surface) sur l'efficacité. Cette partie fera l'objet du chapitre II.

Si les méthodes de transfert thermique introduisent rarement le concept du travail utile, on développera dans le chapitre III la notion d'exergie sous toutes ses formes lesquelles seront appliquées au fonctionnement d'un échangeur de chaleur. Il sera mis l'accent sur l'influence particulière du niveau thermique de la source d'énergie ainsi que les pertes de charges inhérentes à l'écoulement des fluides dans les canalisations constitutives de l'échangeur.

Sur la base du concept de l'exergie développé ci-dessus, le chapitre suivant est consacré à la conception d'un réseau d'échangeurs de chaleur optimal. En effet, nous introduisons deux fonctions objectifs qui sont à minimiser simultanément :

- Flux de création d'entropie.
- Surface globale d'échange.

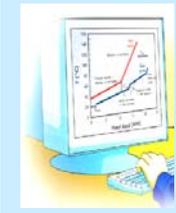
Une analyse assez simpliste montre que le problème de la synthèse optimale d'un réseau d'échangeurs de chaleur conduit à la possibilité de répondre à deux questions inter connexes :

- Recherche d'une source d'énergie sachant l'existence d'un réseau d'échangeurs de chaleur (REC).
- Recherche d'un réseau d'échangeurs de chaleur (REC) optimal étant donné les courants à coupler.

Compte tenu de l'interaction des différentes variables, nous avons jugé utile le recours à la méthode de calcul de degrés de liberté de l'échangeur afin d'énumérer le nombre de variables de conception lesquelles sont contrôlables extérieurement. Après avoir défini les variables, on développera un algorithme de calculs qui nous permettra d'analyser la faisabilité d'un réseau d'échangeur de chaleur (REC). Des exemples illustrent les étapes de calculs tout en référant au diagramme contenu énergétiques (Heat content diagramm).

Pour juger de la pertinence de la méthode exergétique, nous présenterons quelques exemples utilisant différentes méthodes de conception de R.E.C. Les résultats comparatifs sont illustrés dans des tableaux faisant ressortir aussi la différence de la surface d'échange entre les différentes méthodes ainsi que la qualité d'énergie dégradée par suite de l'échange thermique.

En conclusion, on dégagera les principaux résultats ainsi que l'intérêt de cette analyse basée sur le concept d'exergie, dans le couplage source d'énergie –besoin d'augmenter la rentabilité d'un procédé industriel.



Chapitre I

Les méthodes de synthèse d'un réseau d'échangeurs de chaleur

I.1. Introduction

*F*ace à un accroissement simultané de la population, de la consommation d'énergie et de la concentration du gaz carbonique au niveau mondial, l'homme a maintenant pris conscience que son attitude vis-à-vis de l'utilisation de l'énergie est principalement liée aux limites de notre planète à absorber nos rejets qu'à la disponibilité des ressources énergétiques.

La problématique énergétique doit s'inscrire dans un contexte global et pluridisciplinaire de développement durable basé sur des considérations techniques, environnementales et économiques pour garantir à long terme la viabilité de notre planète.

Dans un tel contexte, l'ingénieur énergétique a un rôle important à jouer. Il doit s'efforcer d'utiliser au mieux les ressources énergétiques (énergie primaire) et de réduire autant que possible les rejets thermiques, chimiques, etc. dans l'atmosphère.

Auparavant et en l'absence de la taxation sur les rejets, le niveau exergétique (ou la qualité) des différentes formes d'énergie était ignoré (ou inexploré), ce qui se traduisait par une tendance excessive à l'utilisation abusive de l'énergie à haute valeur exergétique pour satisfaire des besoins à faible niveau de température. Prenons l'exemple d'un procédé chimique où le flux d'alimentation d'une colonne de distillation est chauffé à 80°C par l'intermédiaire d'un échangeur alimenté par une circulation de vapeur surchauffée (2 bar, 150°C). Cette vapeur a été produite dans une chaudière par des gaz de combustion à très haute température (>1000°C). Parallèlement et sur le même site, il n'est pas rare de trouver une ou des réactions exothermiques (à près de 100°C par exemple) nécessitant le refroidissement du réacteur par une circulation d'eau froide. N'est-il pas envisageable de récupérer l'énergie dégagée au niveau du réacteur pour chauffer le flux à l'entrée de la colonne ? On éviterait ainsi les pertes énormes entre le niveau de température élevé des gaz de combustion et les besoins à faible niveau exergétique de la colonne, tout en réduisant les besoins de vapeur et d'eau de refroidissement.

Aujourd'hui une solution à cet état est envisageable, c'est la mise en œuvre d'un réseau d'échangeurs de chaleur par l'exploitation des différents courants existant sur site.

Pour réaliser une synthèse optimale des réseaux d'échangeurs de chaleur, on utilise des différentes méthodes de synthèse.

I.2. Méthodes de synthèse de réseau d'échangeurs de chaleur

D'une façon générale, l'objectif des méthodes de synthèse d'un réseau d'échangeurs de chaleur (HEN : Heat Exchangers Network) est de déterminer la structure d'un réseau d'échangeurs de chaleur, qui facilite le refroidissement d'un ensemble des courants chauds et du chauffage d'un ensemble des courants froids, avec un minimum d'investissement et de frais d'exploitation [01].

Dans la littérature, un grand nombre d'applications ont été présentées pour résoudre le problème de la synthèse d'un réseau d'échangeurs de chaleur optimal.

Principalement, il y a deux approches : l'analyse de pincement (Pinch analysis) [03, 13] et la programmation mathématique [34, 19]. Schématiquement, cette classification est présentée sur la figure n° : I.1.

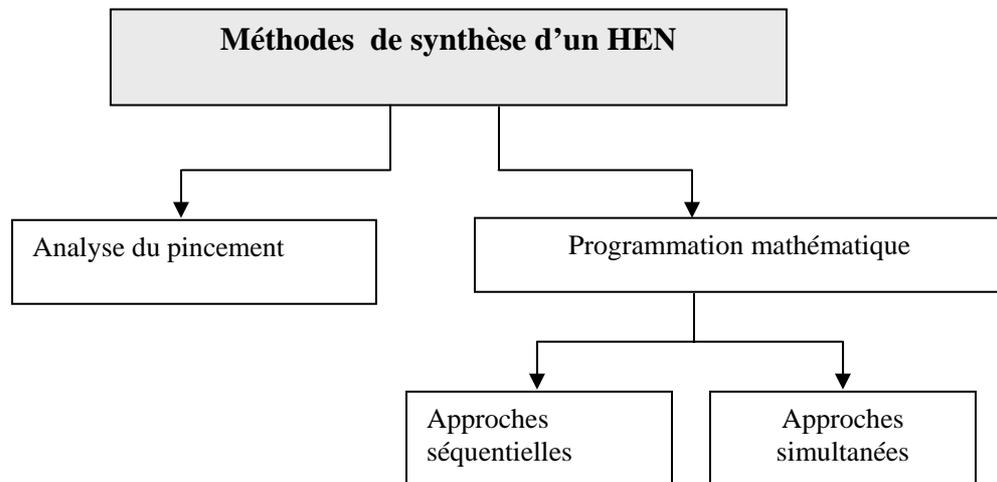


Figure I 1 : Classification des méthodes de synthèse d'un réseau d'échangeurs de chaleur.

I.2.1. Notion du pincement de température (Pinch analysis)

L'analyse du pincement de température utilise des concepts thermodynamiques. C'est un outil puissant qui peut être appliqué à tout type de procédés industriels dans le domaine de la pétrochimie, de la chimie, de la production énergétique, de l'alimentaire, etc.

La méthode fait toujours l'objet de nombreuses recherches telles que les travaux Linnhoff et Hindmarsh [03], Linnhoff, Mason et Wardle [09], et Shenoy [05].

La méthode du pincement de température, dont le développement continue toujours grâce aux travaux de Linnhoff et Flower; Rahal et Bezzina, se base sur une représentation graphique des courants du procédé dans un diagramme enthalpie (H) - température (T). Schématiquement, l'axe des abscisses représente l'enthalpie alors que l'axe des ordonnées est la température. Ainsi, tous les courants chauds nécessitant un refroidissement sont représentés par une seule courbe, appelée courbe globale des courants chauds et tous les courants froids, nécessitant un réchauffage, sont représentés par une courbe globale des courants froids.

L'algorithme de synthèse optimale de réseaux d'échangeurs de chaleur est basé sur la technologie du point de pincement et sur une représentation graphique des courbes globales des courants chauds et froids avec une modification relative aux méthodes antérieures (Linnhoff et Flower) par la spécification des quantités d'utilités chaudes et froides nécessaires au procédé [02].

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

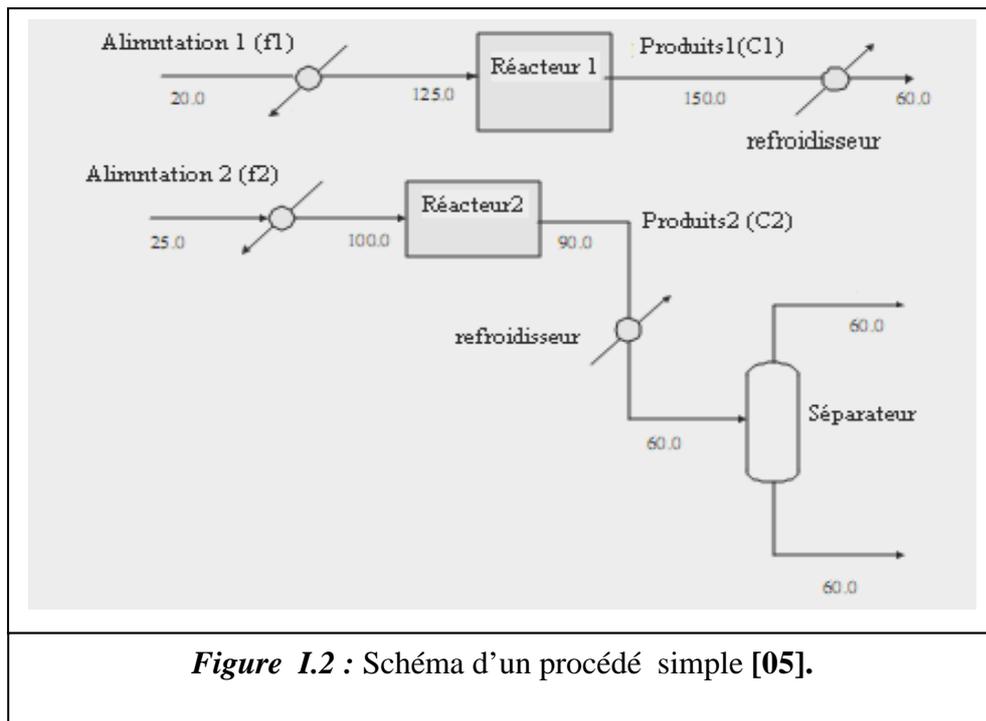
La comparaison de ses quantités d'utilités minimales à celles consommées réellement par le procédé en question, permet de dégager les possibilités d'économie d'énergie qu'on veut réaliser moyennant un surplus d'investissement.

Ce surplus peut être calculé à l'aide de la méthode de design du pinch. La faisabilité de la réalisation du projet d'amélioration dépend du temps de remboursement fixé par le mode de financement [02].

Pour illustrer la méthode du pincement de température, on choisira l'exemple d'un procédé simple (application de Shenoy, 1995)

C'est une technique qui accède à l'évaluation des flux de chaleur dans n'importe quel réseau d'échangeurs de chaleur. Les courants du procédé sont d'abord divisés en courants chauds et froids.

Pour chaque courant, le diagramme enthalpie - température est tracé. Ceci est montré sur la figure n° : I.3 (a) pour le procédé décrit dans la figure n° I.2. Puis, tous les courants chauds (C1, C2) sont combinés pour produire la courbe composante chaude et tous les courants froids (f1, f2) sont combinés pour donner la courbe composante froide. Ces courbes sont représentées sur la figure I.3. (b). Cette combinaison est faite en explicitant les valeurs de capacité calorifique massique de tous les courants de la même sorte (chaude ou froide) dans chaque intervalle de température. Les bornes de l'intervalle de la température correspondent aux températures d'entrée et de sortie des courants.



Les courbes composantes chaudes et froides fournissent une image complète de l'approvisionnement de la chaleur et du besoin en chaleur dans le procédé.

Principalement, tous les courants du procédé peuvent être combinés et visualisés comme un seul courant chaud à contre-courant avec un seul courant froid.

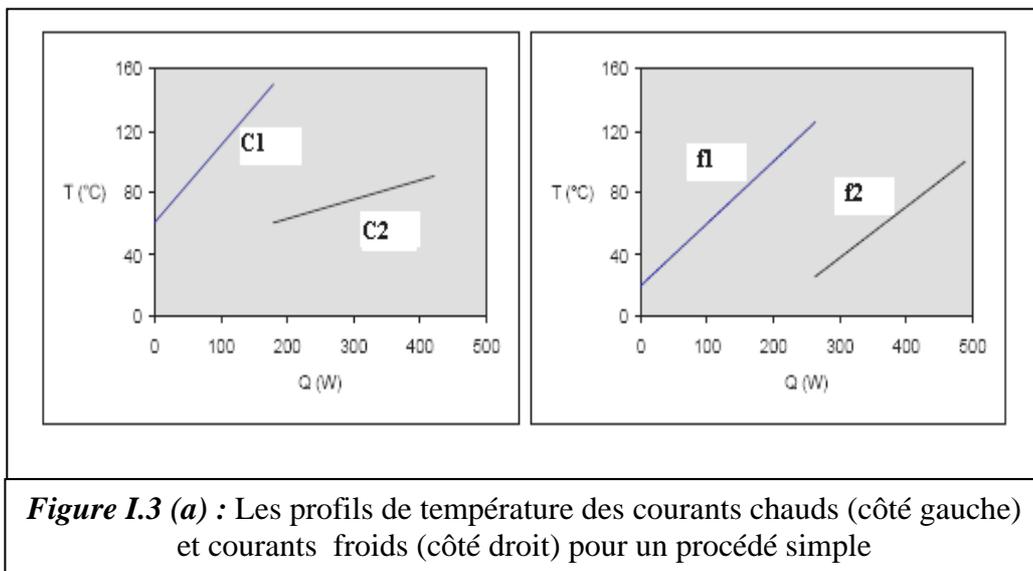
Lorsque les deux courbes sont réunies, la courbe composante combinée est obtenue. Ceci est montré sur la figure n° : I.4. Dans la courbe composante combinée, la température minimum détermine la position relative des deux courbes telle que représentée sur la figure n° : I.4, le pincement de température minimum est 20 °C.

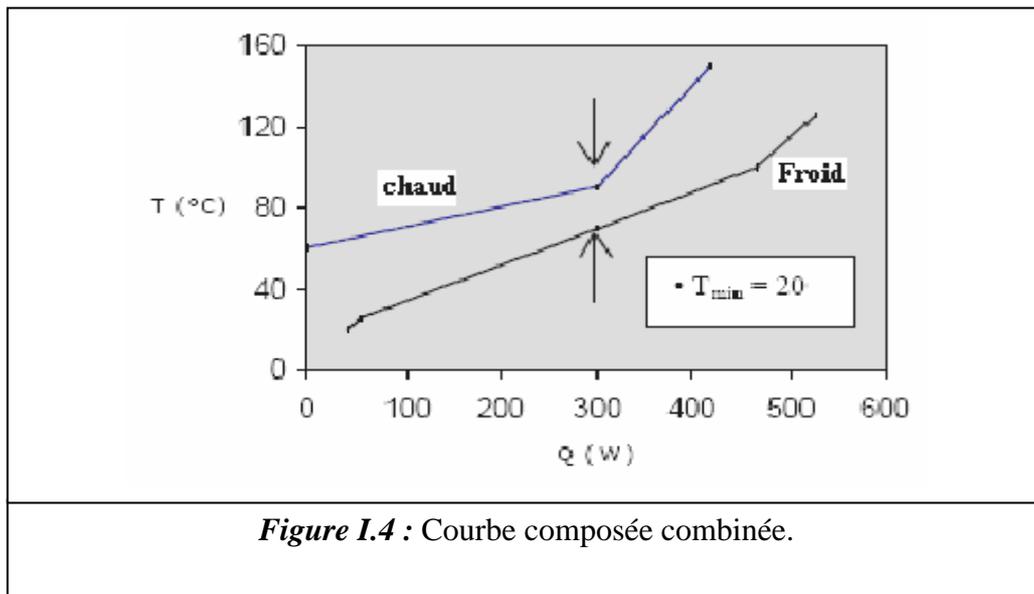
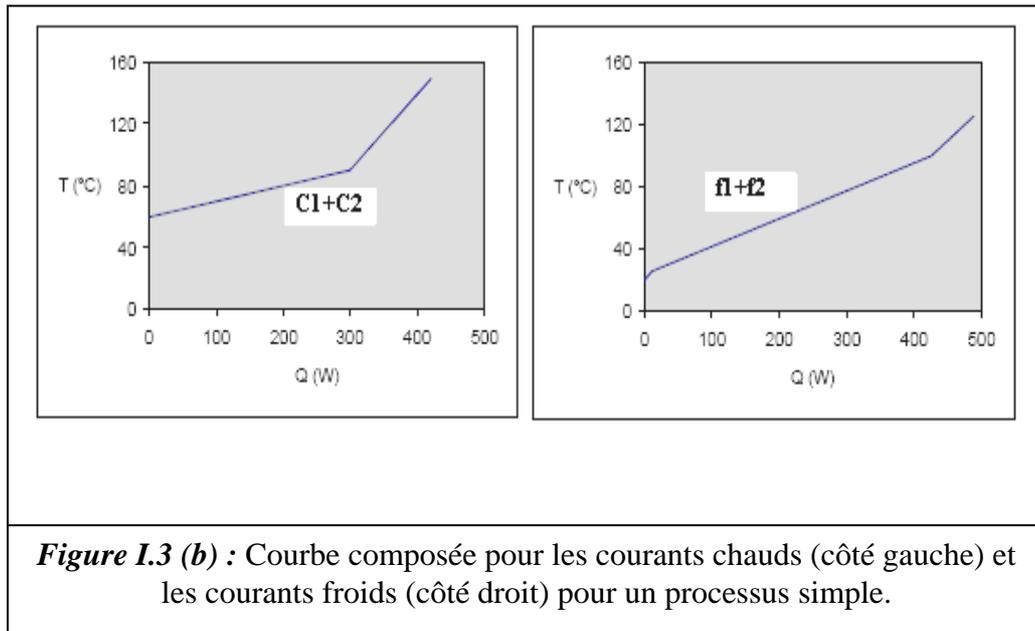
Le point au niveau duquel les deux courbes obtenues sont les plus proches s'appelle le point du pincement et la température correspondante s'appelle la température de pincement $(\Delta T)_{\min}$. Le point du pincement est montré par des flèches dans la figure n° :I.4.

Thermodynamiquement, le point du pincement divise le procédé en deux régions distinctes.

Au-dessous du point de pincement, on peut noter un excès (ou surplus) de la chaleur et seul le refroidissement des utilités est exigé. Toute utilité de chauffage fourni au procédé en dessous de la température de pincement ne peut pas être absorbé et doit être reporté par le procédé à l'utilité de refroidissement, augmentant la quantité d'utilités froides nécessaires.

De même, le problème au-dessus du pincement n'exige que les utilités de chauffage et aucune utilité de refroidissement. Tout utilité de refroidissement au-dessus de la température du pincement ne doit se compenser par les utilités chaudes disponibles [05].





Une fois que le problème est divisé en deux sous-problèmes, le courant chaud (le plus froid dans l'ensemble de courants chauds) est couplé avec le courant froid (le plus chaud dans l'ensemble des courants froids).

Il est considéré possible l'échange thermique entre deux courants si les deux principes de la thermodynamique sont respectés. Une telle interaction entre les courants définit le couplage des deux courants.

Si l'échange thermique est impossible, le prochain courant le plus contraint est choisi en considération. Ce processus est continué jusqu'à ce qu'un couplage soit trouvée.

La quantité de chaleur transférée est égale à la quantité de chaleur maximum thermodynamiquement transférable. Ce processus est répété pour tous les courants.

La configuration du réseau d'échangeurs de chaleur est déterminée sur la base des couplages réalisés [05].

- Méthode du pincement ou problem table algorithm [03]

L'application de la méthode de conception du pincement est illustrée dans l'exemple suivant :

Tableau I. 1 : Données thermique d'un procédé de chauffage.

Nombre et type du courant	Débit calorifique [KW/°C]	Température d'entrée [°C]	Température de sortie [°C]
(1). Chaud	2	150	60
(2). Chaud	8	90	60
(3). Froid	2,5	20	125
(4). Froid	3	25	100

On suppose que la chaleur spécifique C_p est une constante (valeur moyenne) et que les courants ne subissent pas de changement de phase.

L'endroit du pincement pour un problème du réseau d'échangeurs de chaleur, ainsi que la condition d'utilités minimales peuvent être calculés en utilisant l'algorithme du Linnhoof et Flower pour une valeur indiquée de ΔT_{\min} .

Dans le tableau n° : I .2, les données des courants sont montrées du côté gauche, divisé en six intervalles de température, correspondant aux « sous-réseaux » soit : SR1, SR2, ,SR6.

Ces intervalles sont définis par les températures initiales et finales des courants du procédé.

Par exemple : SR3 est défini par la température finale du courant n° 4 et la température initiale du courant n° 2.

On note que, pour assurer l'échange de chaleur entre les courants, il faut séparer les températures des courants chauds et froids au minimum par un écart de température ΔT_{\min} .

Par exemple, la frontière supérieure de SR3 est définie par le courant froid n° 4 à température 100°C tandis que le courant chaud en ce point est à 120°C

On remarque que pour chaque sous-réseau, il y aura un déficit ou un excédent mais jamais les deux à la fois. Ces valeurs de déficit ou d'excédent sont présentées dans la colonne 1 du tableau n° I.2.

- Méthode de calcul pour la colonne 1 :

La convention de signe est telle qu'un surplus est négatif alors qu'un déficit est positif.

Les valeurs du déficit dans chaque sous réseau est calculé suivant la formule :

$$\text{déficit} = \sum (\dot{m} Cp)_f (\Delta T)_f - \sum (\dot{m} Cp)_c (\Delta T)_c$$

Exemple :

Pour SR1 :

$$\begin{aligned} \text{déficit} &= -(\dot{m} Cp) \Delta T \\ &= 2(150 - 145) = -10 \end{aligned}$$

Pour SR2 :

$$\text{déficit} = +2,5(125 - 100) - 2(145 - 120) = +12,5$$

Une autre importance de 'problem table algorithm' est la possibilité de l'échange de chaleur à partir des réseaux le plus haut aux réseaux secondaires inférieurs. En d'autres termes, le surplus de la chaleur des sous-réseaux de température plus élevés peut être employé pour satisfaire le déficit (ou manque) de la chaleur des sous-réseaux de plus basse température. La quantité de la chaleur qui peut être transférée de cette façon est présentée dans la colonne 2 et la colonne 3 du tableau n° I. 2.

Au début, on suppose que la chaleur d'entrée des utilités externes égale zéro. Ceci est indiqué dans le tableau n° I.2 par une entrée nulle pour SR1 dans la colonne 2.

Après avoir réalisé cette condition, il est facile de calculer le bénéfice (Output) de SR1, en ajoutant simplement l'excès à l'entrée (Input) . Alors, ce dernier constitue l'entrée du sous réseau SR2. Le procédé de calcul est répété pour tous les sous-réseaux.

Pour être plus claire, l'écoulement de la chaleur des sous-réseaux à hautes températures aux sous-réseaux de basse température ne doit pas être négatif.

Ainsi, si la valeur négative est produite dans les colonnes 2 et 3 du tableau n° I. 2, l'entrée de la chaleur à SR1 doit être augmentée. L'augmentation minimale est cette quantité qui assure que tous les flux de chaleur sont positifs ou nuls (colonnes 4 et 5)

L'utilisation minimale d'utilités chaudes est donnée par l'entrée à SR1 (la colonne 4).

L'utilisation minimale d'utilité chaude est donnée par le flux de chaleur qui sort du sous réseau le plus froid (la colonne 5).

Tableau I .2 : Tableau récapitulatif des résultats du couplage des courants.

Sous réseaux	Température des courants		Déficit	Accumulé		Flux de chaleur		
	Courants froids (3) (4)			Input	Output	Input	Output	
	T (°C)							
		150						
SR1		125	145	- 10	0	10	107,5	117,5
SR2	↑	100	120	+12,5	10	-2 ,5	117,5	105
SR3	↑	70	90	+105	-2,5	-107,5	105	0
SR4	↑	40	60	-135	-107,5	+27,5	0	135
SR5	↑	25		+82,5	+27,5	-55	135	52,5
SR6		20		+12,5	-55	-67,5	52,5	40

On remarque que le flux de la chaleur de SR3 à SR4 est nul et que tous les autres flux de chaleur sont positifs. Ce point où le flux de la chaleur est nul représente le point du pincement de température donc il n'est pas possible de transmettre de la chaleur au point du pincement car il divise le problème en deux régions : chaude et froide.

L'extrémité chaude comporte tous les courants ou les parties des courants plus chauds que la température du pincement. Dans cette région, on rappelle qu'on ne peut plus avoir recours à un refroidissement externe (ou utilité froide).

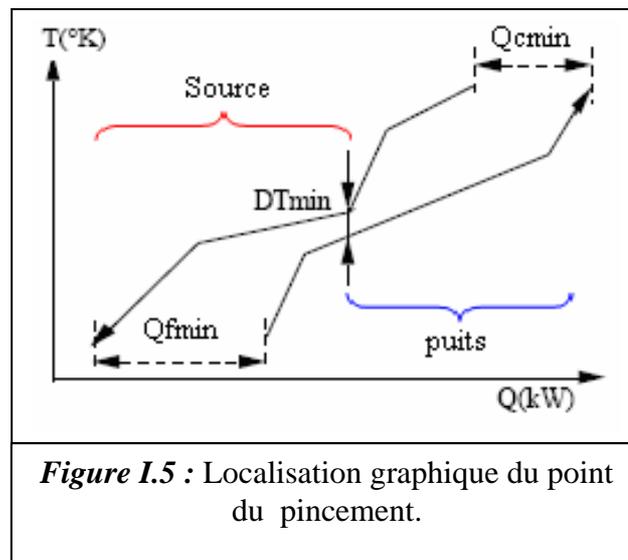
L'extrémité froide, qui compromet tous les courants plus froids que la température du pincement, montre qu'on ne peut pas avoir recours à un chauffage externe (ou utilités chaudes).

La méthode de Linnhoff consiste à travailler directement sur les bilans enthalpiques par niveaux de température. L'algorithme de minimisation du pincement sert à déterminer la valeur de l'appoint correspondant au pincement minimal. L'algorithme original de Linnhoff définit le « Problem table algorithm ».

▪ Définition du point de pincement

L'écart de température minimum (ΔT_{\min}) entre les deux courbes définit la température du point de pincement (T_{pinc}). La température de pincement sépare le procédé étudié en deux sous systèmes distincts:

1. Le sous système à droite (ou du-dessus) du pincement est caractérisé par un manque d'énergie (appelé zone puits).
2. Le sous système à gauche (ou au-dessous) du pincement est caractérisé par un surplus d'énergie (appelé zone source). [01]



L'analyse du pincement de température est une approche rigoureuse et structurée qui permet d'identifier plusieurs types de projets d'amélioration des procédés industriels. On peut l'utiliser, par exemple, pour réduire les frais d'exploitation ; désengorger certaines étapes de procédés ; améliorer l'efficacité énergétique.

L'analyse du pincement se concentre essentiellement sur ces deux aspects :

1. Dans un procédé industriel, la consommation d'une ressource suit le schéma de la figure n° :I. 6. On utilise une ressource de grande qualité que l'on rejette dans l'environnement sous une forme dégradée.
2. Dans le cas d'une consommation d'eau, on peut alimenter le procédé en eau propre que l'on devra ensuite assainir dans une usine de traitement d'effluents avant son rejet à l'environnement [06, 43].

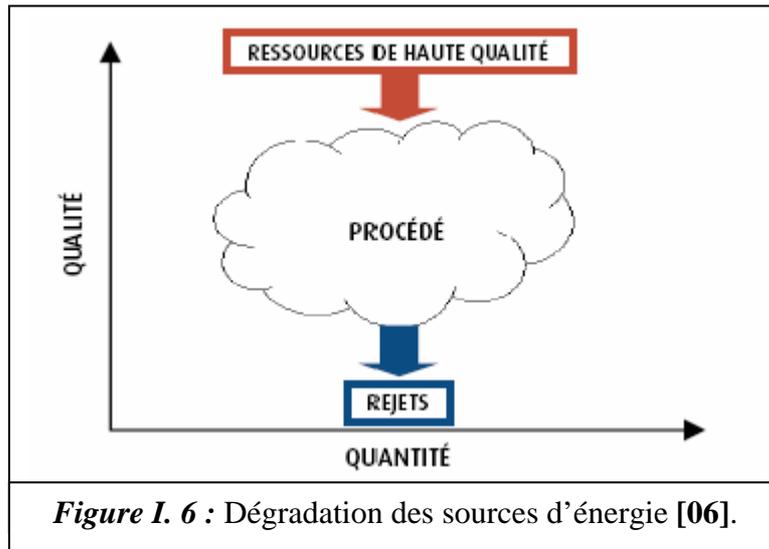


Figure I. 6 : Dégradation des sources d'énergie [06].

La capacité de faire correspondre l'offre et la demande dépend du niveau de qualité demandé par un équipement et du niveau de qualité disponible localement. Dans le contexte de la gestion des utilités, la qualité s'exprime sous la forme du niveau de température pour l'énergie et du degré de pureté pour l'eau.

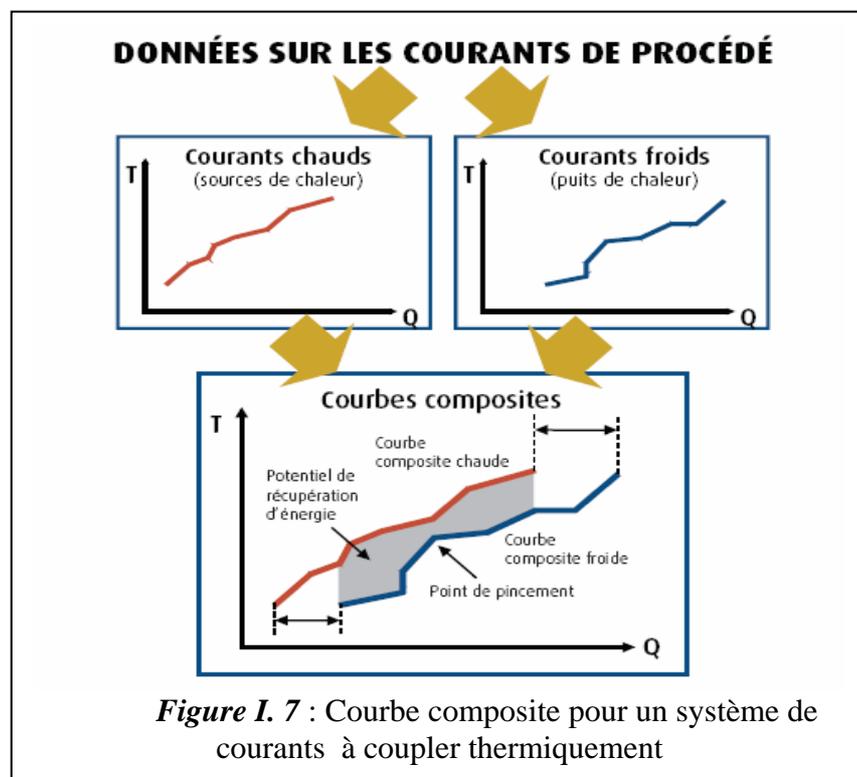
Lorsque l'on aborde un problème avec la méthode du pincement, ce sont toujours les mêmes principes qui s'appliquent, que l'on s'intéresse à la gestion de l'énergie, ou de l'eau :

- On peut représenter le procédé en fonction de ses besoins et de ses rejets (puits et sources) pour une ressource donnée (énergie, eau, etc).
- La solution optimale est obtenue en réalisant la meilleure adéquation possible entre les sources et les puits compatibles.
- Le paramètre, qui permet de savoir si une source et un puits sont compatibles, est la qualité, par exemple, la température dans les cas de l'énergie, la pureté pour l'eau [06, 46].

▪ Construction des courbes composites

L'un des principaux outils utilisés dans l'analyse du pincement de température est le diagramme des courbes composites. La construction de ces courbes est simple mais les informations qu'elles fournissent sont des plus intéressantes.

En effet, les courbes composites sont utilisées pour mettre les valeurs cibles de consommation minimale d'énergie d'un procédé. Elles représentent le profil des sources de chaleur disponibles (courbe composite chaude) et le profil des besoins thermiques du procédé (courbe composite froide). Selon leur forme et leur emplacement, les courbes renseignent sur les possibilités de récupération de chaleur au sein du procédé (Figure I. 7). [06, 43]



▪ Méthode du diagramme de contenu de chaleur (Heat content diagramm)

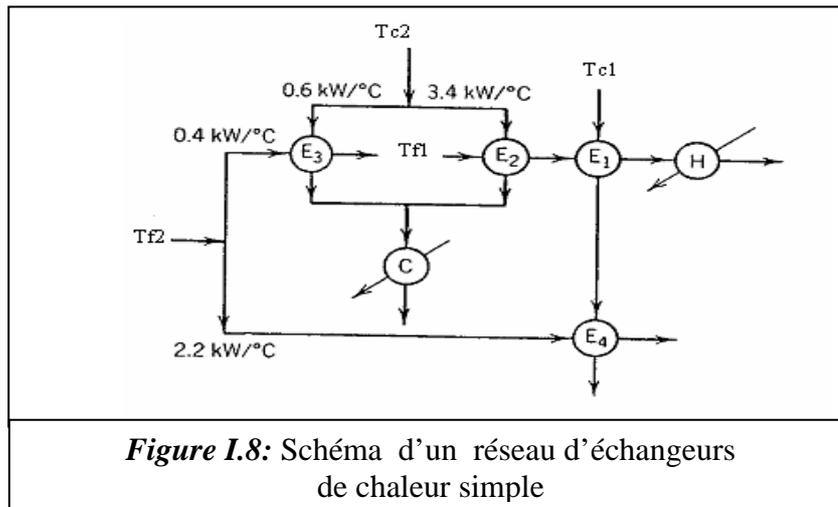
La stratégie de cette méthode est de créer un réseau d'échangeurs de chaleur dont le coût est minimal avec une quantité maximale d'échange de chaleur entre les courants chauds et les courants froids.

Cette méthode exige un algorithme dit 'Algorithme de surface minimale' lequel fournit des règles pour déterminer la quantité maximale de chaleur échangée entre les courants à partir de leur couplage. Ces règles peuvent être facilement visualisées et identifiées sur un simple diagramme dit diagramme de contenu de chaleur (Heat content diagramm).

Généralement, l'axe vertical du diagramme représente les températures initiales et finales des courants froids et des courants chauds. L'origine de l'échelle est placée de telle façon que tous les courants chauds soient représentés au dessus de l'origine et les courants froids au dessous de l'origine. L'axe horizontal représente le débit calorifique ($\dot{m} C_p$) de différents courants (chauds et froids). Dans le diagramme, chaque courant est représenté par un bloc dont la surface correspond à la quantité de chaleur qu'il faut enlever ou apporter pour atteindre la température demandée [07].

➤ **Exemple d'application de cette méthode :**

Dans la figure I.8, le réseau d'échangeurs de chaleur met en contact deux courants chauds et deux courants froids. Les échangeurs interagissant entre les courants sont identifiés par E_i . Pour calculer la quantité de chaleur échangée dans chaque échangeur de chaleur, on utilisera le diagramme de contenu de chaleur (HCD : Heat content diagramm).



Dans la première étape de l'algorithme de la surface minimale, on représente les différents courants du procédé dans le diagramme enthalpique [07]:

- L'axe vertical représente les températures initiales et finales des courants chauds et froids.
- L'axe horizontal représente le débit calorifique ($\dot{m} C_p$) des courants chauds et froids.

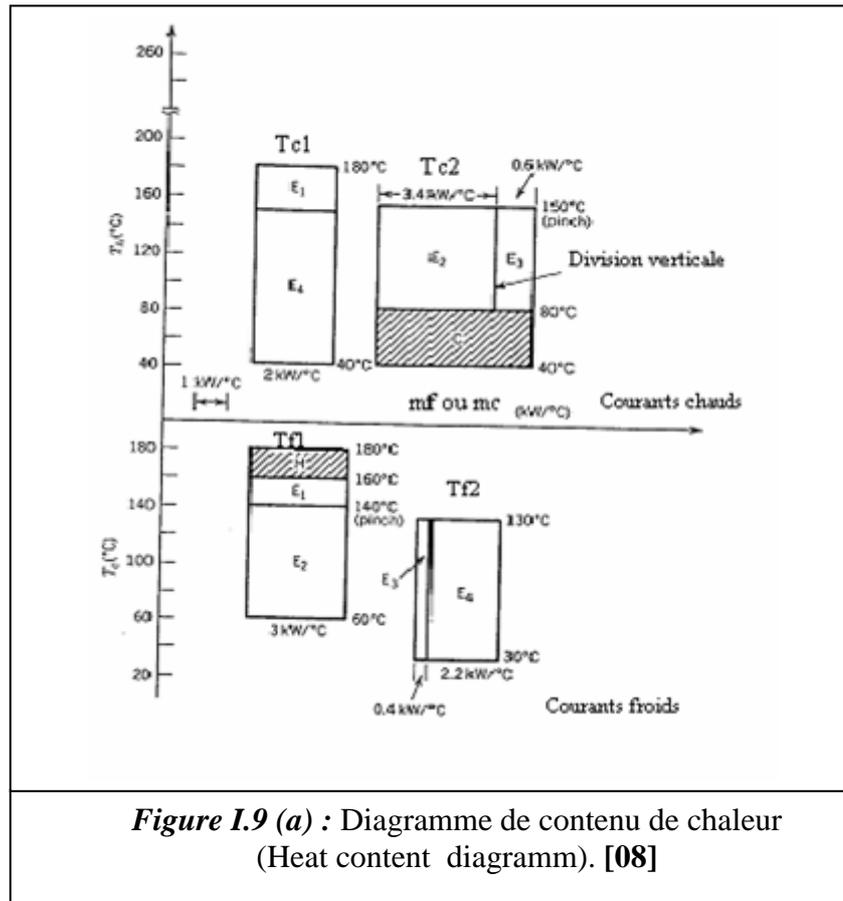


Figure I.9 (a) : Diagramme de contenu de chaleur (Heat content diagramm). [08]

Dans la deuxième étape, on calcule la quantité de chaleur qu'il faut enlever du courant chaud ou apporter à un courant froid dans chaque échangeur de chaleur.

La quantité de chaleur est représentée par la surface de chaque bloc, qui est la surface du rectangle :

$$A = (\Delta T) \times \dot{m} C_p$$

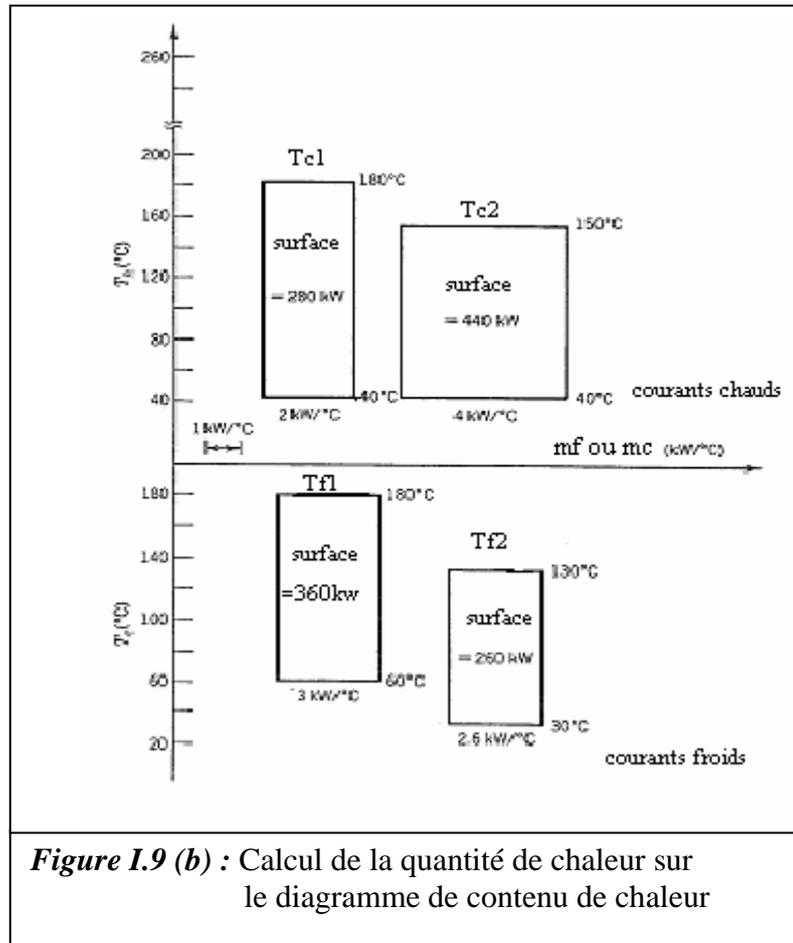


Figure 1.9 (b) : Calcul de la quantité de chaleur sur le diagramme de contenu de chaleur

I.2.2. Programmation mathématique

Les méthodes d'optimisation mathématique d'un réseau d'échangeurs de chaleur peuvent être subdivisées en deux approches : approches séquentielles et approches simultanées [04, 10].

I.2.2.1 Approches séquentielles

Les méthodes séquentielles ont pour objectif la réduction de la complexité du problème en décomposant le problème principal en sous problèmes, qui sont alors résolus séquentiellement. Elle comprend trois étapes essentielles à savoir :

- Coûts des utilités dans les procédés.
- Nombre des unités (échangeurs).
- Coût d'investissement du réseau. [04]

Papoulias et Grossmann (1983) ont proposé un modèle pour prévoir la consommation minimale d'énergie en utilisant la programmation linéaire, et le nombre minimum d'unités en utilisant la programmation linéaire mixte entière MILP. (MILP: mixed-integer linear programming) [04].

Floudas et al ont développé un modèle pour minimiser les coûts annuels dits totaux TAC (total annual costs). Ce modèle comporte deux étapes. D'abord, le modèle MILP minimise le nombre d'échangeurs de chaleur dans le réseau. Ensuite, on fixe la structure de l'échangeur de chaleur pour minimiser le TAC du réseau en exploitant le modèle NLP (Programmation non linéaire) [04].

Asante et Zhu (1996, 1999) ont combiné la technologie de pincement et la programmation mathématique pour simplifier la modification du procédé par un concept thermodynamique définissant la notion du pincement de réseau. Dans cette méthode, les modèles MILP sont résolus séquentiellement jusqu'à ce que la quantité de l'énergie désirée soit obtenue.

Après conclusion de la structure finale, un modèle de programmation non linéaire (NLP) est résolu pour réduire au minimum le coût annuel du réseau et pour établir la meilleure configuration des courants (série, parallèle, series-parallèle etc.).

L'avantage de cette approche qu'elle est sensible à l'ordre de MILP et les sous réseaux optimaux peuvent être obtenus pour différents utilisateurs pour le même problème [11].

Xin X. Zhu (1997) ont présenté une méthode simple basée sur le concept du bloc proposé par Zhu et al (1995). L'idée fondamentale est de simplifier un problème de conception en le décomposant en un certain nombre de blocs. Dans chaque bloc, les courants composites présentent des profils similaires alors que les courants chauds compensent exactement le bilan énergétique nécessaire au chauffage des courants froids.

Un modèle MILP est combiné à un modèle simple MINLP pour qu'ils soient utilisés pour le choix de la meilleure séquence de couplage possible des courants tout en déterminant les rapports optimaux de divisions des courants.

Les conceptions initiales établies par une telle méthode peuvent être exploitées pour l'optimisation de la consommation d'énergie et la surface nécessaire des échangeurs pour les unités dont le nombre d'éléments est faible.

De meilleures estimations initiales sont à adopter pour l'optimisation du coût induit par le réseau. L'avantage principal de la méthode réside dans le fait que les réseaux obtenus sont d'une meilleure qualité sur le plan efficacité d'échange [12].

I.2.2.2. Approches simultanées

Les techniques de l'optimisation simultanée considèrent tous les problèmes mentionnés antérieurement dans des modèles rigoureux lesquelles, dans plusieurs cas, sont une formulation MINLP (Programmation non-linéaire mixte).

Les approches simultanées ont mis en évidence leur supériorité sur les méthodes séquentielles. Les problèmes qu'on rencontre avec les approches simultanées tiennent de la complexité du modèle et de la difficulté mathématique dans la détermination de la solution optimale [04].

Les méthodes de la programmation mathématique ont été élaborées initialement par Ciric et Floudas [13], Yee et Grossmann [15, 16], J.Zamora et E. Grossmann [17].

D'abord, Ciric et Floudas (1990) ont optimisé la quantité d'énergie nécessaire pour un réseau, tout en proposant un modèle de programmation non-linéaire mixte entière (MINLP) pour l'agencement des réseaux d'échangeurs de chaleur.

Ce modèle introduit tous les couplages possibles des courants du procédé. Les configurations du réseau et la réaffectation de l'échangeur sont introduits par une simple formulation mathématique.

Egalement, il est établi que les équations d'échange thermique, le couplage des conduites, coût, pertes de charge et la variation du coefficient d'échange thermique seront intégrés dans la formulation du problème.

La prédétermination de la consommation d'utilités peut être à l'origine d'une défaillance de la méthode dans l'optimisation de la fonction aire-utilités alors que les maximums locaux (relatifs) peuvent constituer des pièges pour la solution recherchée. [04, 11, 13]

Yee et Grossmann (1991) ont développé une approche en deux étapes, dans laquelle la première étape était la programmation linéaire entière mixte (MILP) pour la détermination des possibilités économiques du procédé.

En outre, le nombre de nouveaux échangeurs qui pourraient être exigés dans le réseau final est déterminé dans cette étape. Une formulation de MINLP a été appliquée pour trouver le réseau optimal. Puisque le modèle de MINLP est très détaillé, les différents types des variables binaires sont nécessaires dans leur formulation. Cette issue peut limiter l'application du modèle aux problèmes liés aux installations à échelle réduite [04, 15].

Ma et al (2000) ont proposé une approche en deux étapes, dans la première étape un modèle d'approche de température constante (CAT : constant approach temperature) est utilisé pour obtenir une structure du réseau d'échangeurs de chaleur optimal. Puisque l'approche de température est identique pour tous les échangeurs de chaleur, le modèle de CAT est un problème d'optimisation de type MILP (Programmation linéaire mixte entière).

D'abord, le modèle de CAT est résolu puis un modèle de MINLP qui tient compte des températures réelles pour achever une conception de réseau d'échangeurs de chaleur finale [11].

Furman et Sahinidis (2001) ont montré que les problèmes de synthèse des réseaux d'échangeurs de chaleur (HENs : Heat Exchanger Networks synthesis) sont résolus séquentiellement ou par une méthode simultanée.

Ceci limite l'utilisation des méthodes déterministes, ainsi les méthodes stochastiques telles que la méthode de recuit simulé (SA : simulated annealing), recherche de tabou (TS : tabu search) et l'algorithme génétique (GA : genetic algorithm) sont des approches les plus utiles pour aborder les problèmes de synthèse des réseaux d'échangeurs de chaleur [18, 19].

D'abord, la modification des réseaux d'échangeurs de chaleur par les méthodes stochastiques a été suggérée par Athier et al (1998) dans lequel la méthode de recuit simulé est couplé avec la méthode de NLP.

Par conséquent des paramètres structurels ont été modifiés par la méthode de recuit simulé et les paramètres continus ont été manipulés dans la section de NLP. L'approche doit être répétée jusqu'à la réalisation du meilleur réseau d'échangeurs de chaleur, parce que la méthode de recuit simulé (SA) est incapable d'examiner l'espace entier de la solution.

En outre, les auteurs ont rencontré quelques problèmes liés à la convergence de la méthode NLP à cause de l'optimisation simultanée des variables continues.

Y. Krishna Mohan et C.V.S. Murty ont illustré l'application de la technique d'évolution Différentiel (DE) pour la synthèse des réseaux d'échangeur de chaleur. Le modèle de la synthèse du réseau d'échangeurs de chaleur proposé considère que le courant se partage, élimine l'acceptation de simplification du mélange isotherme des courants devisés.

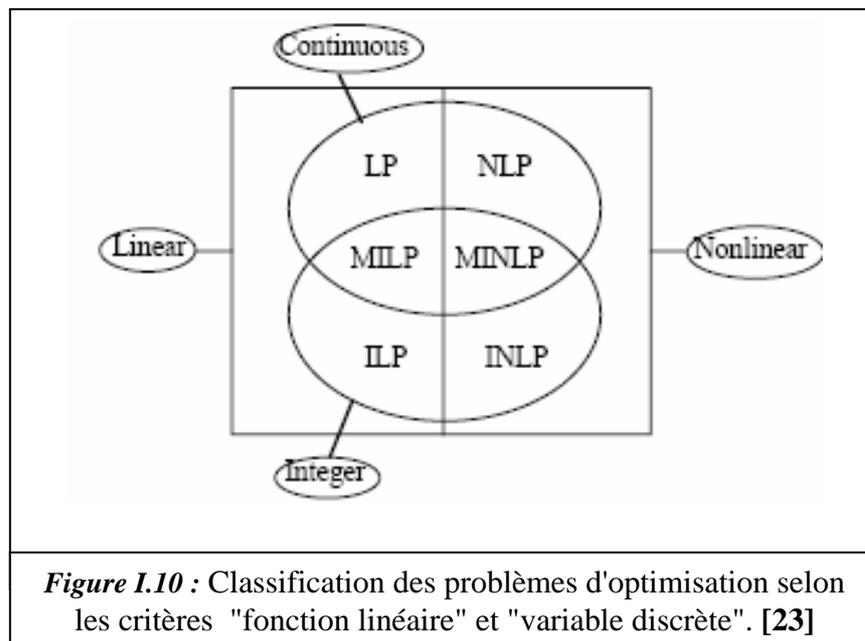
Le modèle d'évolution différentiel ne se base pas sur la décomposition du problème en sous problèmes, mais utilise l'approche simultanée pour optimiser la structure du réseau des échangeurs de chaleur, les flux de chaleur et le pincement minimum de température [20].

Dans la littérature, le modèle DE a été appliqué dans certaines études et les résultats de ces études encouragent l'utilisation de ce modèle.

Donc, ce modèle représente une marche en avant dans la recherche des algorithmes globaux forts et efficaces d'optimisation pour résoudre le problème de synthèse des réseaux d'échangeurs de chaleur [20].

L'approche simultanée comporte une seule étape d'optimisation. Dans cette étape, toutes les variables sont optimisées simultanément. Les problèmes qui se posent dans les approches simultanées sont la complexité du modèle et la difficulté d'atteindre la solution optimale.

Historiquement, la classification des problèmes d'optimisation se réduisait aux problèmes linéaires (LP) et non linéaires (NLP). Les différentes classes de problèmes comptées actuellement, ainsi que certaines procédures de résolution, sont présentées sur la figure I.10



Abréviation	Signification
LP	Programmation linéaire
ILP	Programmation linéaire en nombres entiers
MILP	Programmation mixte entière linéaire
NLP	Programmation non-linéaire
INLP	Programmation non-linéaire en nombres entiers
MINLP	Programmation mixte entière non-linéaire

Selon la nature de leur formulation, les propriétés mathématiques des problèmes, telles que la différentiabilité et la convexité peuvent conduire à des techniques de résolution particulières. Celle des problèmes mixtes comportant simultanément des variables entières et réelles, on peut distinguer la programmation mixte-entière linéaire (MILP) et mixte entière non-linéaire (MINLP).

La formulation générale d'un problème MINLP est donnée par :

$$\text{Min } Z = f(x, y) \quad \begin{cases} h(x, y) = 0 \\ g(x, y) \leq 0 \\ x \in X, y \in N^m \end{cases}$$

où :

$f(x,y)$: fonction objectif.

$h(x,y)$: ensemble des contraintes égalité.

$g(x,y)$: ensemble des contraintes inégalité.

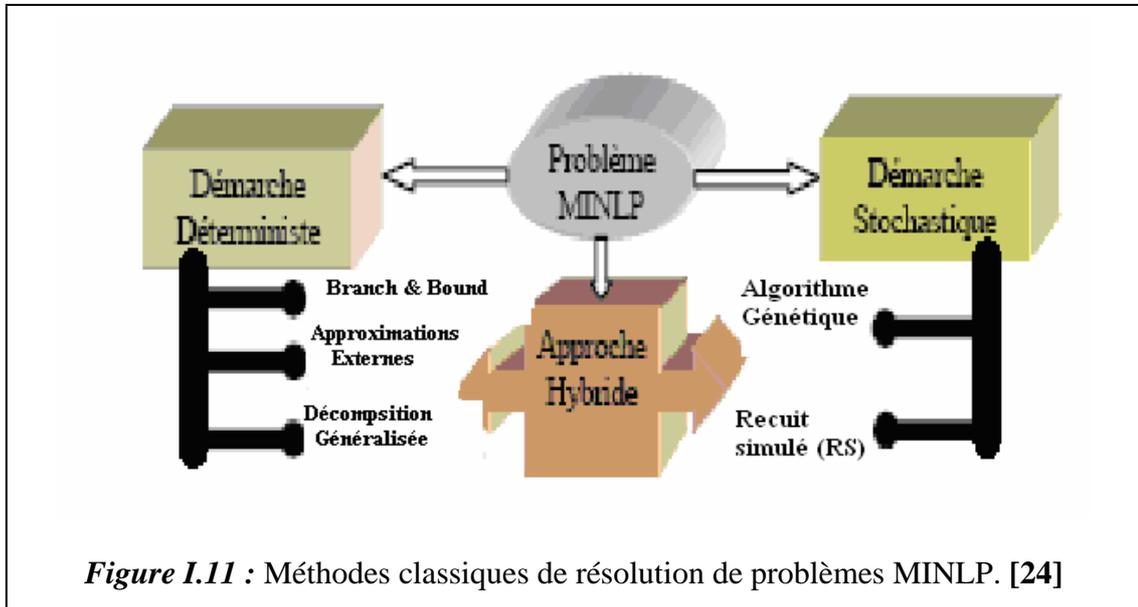
X : sous-espace vectoriel de \mathbb{R}^n .

Le vecteur x représente l'ensemble des variables continues du problème, et correspond généralement aux variables physiques (débit, température, pression, etc). Le vecteur d'entiers y (variables discrètes) est relié à la structure du procédé, et chacun de ses éléments peut traduire l'existence ou non d'une opération unitaire, le nombre d'unités d'un procédé, etc.

Le problème MINLP représente une formulation très complexe, englobant de façon évidente les classes NLP et MIP [24, 16, 47].

I.2.3. Méthodes d'optimisation pour la résolution des problèmes MINLP

On distinguera deux classes de méthodes pour le traitement de problèmes MINLP : la programmation stochastique et la programmation déterministe [24].



I.2.3.1. Méthodes déterministes

Dans le cadre des méthodes déterministes, on distinguera deux approches de résolution :

- L'approche dite constructive, principalement représentée par la méthode de Branch et Bound (Leyffer, 1999), où les différentes variables sont considérées comme continues puis discrétisées. Cette méthode est une extension du cas linéaire où à chaque sommet, on résout un sous problème continu non linéaire au moyen d'une méthode NLP [24].
- L'approche dite itérative, représentée par des méthodes telles que la décomposition généralisée de Benders (Benders, Geoffrion) ou la méthode des approximations externes (Duran et Grossmann).

Le principe général de cette approche est la résolution successive d'un sous problème NLP (où toutes les variables discrètes sont fixées) et d'un problème maître MILP afin de prédire les bornes inférieures ainsi que les valeurs des variables discrètes [24].

Deux méthodes de programmation mathématique efficaces sont largement utilisées pour la résolution de problèmes MINLP. Les approximations externes/égalité relaxation et la méthode de Branch et Bound (les deux méthodes sont présentées dans l'annexe 01).

I.2.3.2. Méthodes Stochastiques

Principalement issues des concepts de l'intelligence artificielle, elles sont fondées sur des règles d'évolution probabilistes, contrairement aux méthodes déterministes qui s'appuient sur les propriétés mathématiques.

Le plus souvent, elles utilisent uniquement la valeur même de la fonction objectif (critère à optimiser) et non ses propriétés, comme sa différentiabilité, à la base de la plupart des méthodes déterministes, qui permet de calculer une direction d'évolution.

Le principal attrait de ces techniques concerne le traitement de problèmes non convexes. En effet, la contrainte de convexité n'a pas une priorité majeure telle qu'elle est vis-à-vis des méthodes déterministes numériques. De plus, les méthodes stochastiques peuvent s'extraire des minimums locaux pour se diriger vers une solution globale.

Il existe deux grandes classes d'adaptation de méthodes stochastiques, les méthodes de voisinage et les algorithmes évolutifs [21, 22, 24, 47].

Afin d'illustrer le principe général, deux méthodes appartenant respectivement aux deux tendances sont présentées, ce sont les méthodes les plus utilisées pour le traitement des problèmes à structure variable, comme c'est le cas pour les problèmes de synthèse de schémas de procédés ou d'identification de modèles, il s'agit du :

- Recuit simulé.
- Algorithmes génétiques. [24]

Un détail de l'application fait l'objet de l'annexe 01.

Bochenek et Jezowski (2006), Jezowski et al (2007) ont proposé une méthode basée sur l'algorithme génétique et le concept du pincement de température. Cette méthode optimise les paramètres discrets et continus par l'algorithme génétique.

L'algorithme génétique est préférable pour optimiser les variables discrètes mais il est trop lent pour contrôler les variables continues. Cette méthode prend du temps par exemple 10 heures pour l'exécution d'un réseau simple [11].

Ebrahim Rezaei et Sirous Shafiei (2008) recommandent l'amélioration des réseaux d'échangeurs de chaleur par une combinaison entre l'algorithme génétique (AG), programmation non-linéaire (NLP) et les méthodes de programmation linéaires en nombres entiers (ILP).

Ainsi, l'algorithme génétique (GA) sélectionne différents réseaux pendant l'optimisation et donne la meilleure structure modifiée du réseau. La formule de NLP avec des variables continues est utilisée pour récupérer le maximum d'énergie. L'optimisation simultanée du NLP est remplacée par une boucle de recherche pour trouver le pincement de température minimum et les rapports de division des courants. De cette manière le problème de NLP est converti en procédé de LP, qui est plus facile à résoudre.

Après chaque LP, un problème ILP est résolu pour déterminer le coût d'investissement minimum pour réaliser les modifications. Le modèle ILP détermine l'élimination ou la réutilisation des échangeurs existants et amener des nouveaux échangeurs dans le réseau.

Les résultats prouvent que la méthode proposée trouve habituellement de meilleures solutions que ceux rapportés dans la littérature [11, 19].

Afin d'améliorer l'efficacité des méthodes stochastiques, certaines études ont proposé une démarche combinant les deux classes de méthodes citées précédemment.

I.2.3.3. Démarche hybride

Cette méthodologie, combinant les démarches déterministes et stochastiques, permet d'améliorer dans un certain sens les résultats obtenus, en s'affranchissant des contraintes présentes dans une méthode par l'utilisation de l'autre. Généralement, au niveau le plus élevé, les méthodes stochastiques jouent le rôle de problème maître, et à un niveau plus bas, les méthodes déterministes, de problème esclave. Des orientations similaires ont été trouvées dans la littérature dans d'autres domaines que celui du génie des procédés.

Généralement dans les problèmes de conception ou de synthèse des procédés, la problématique se traduit par des modèles assez complexes multi-objectifs. L'idée initialement proposée consiste à la mise en oeuvre des méthodes de résolution NLP ayant démontré leurs performances telles que SQP (Successive Quadratic Programming).

Seulement, l'efficacité de ces méthodes nécessite une bonne initialisation d'où l'application d'une procédure robuste permettant ainsi une bonne initialisation.

Le choix le plus pertinent est l'utilisation de méthodes stochastiques telles que la méthode de recuit simulé ou algorithmes génétiques qui ont prouvé leur efficacité pour l'obtention de bonnes solutions. La méthodologie utilisée est présentée dans la figure I.12 :

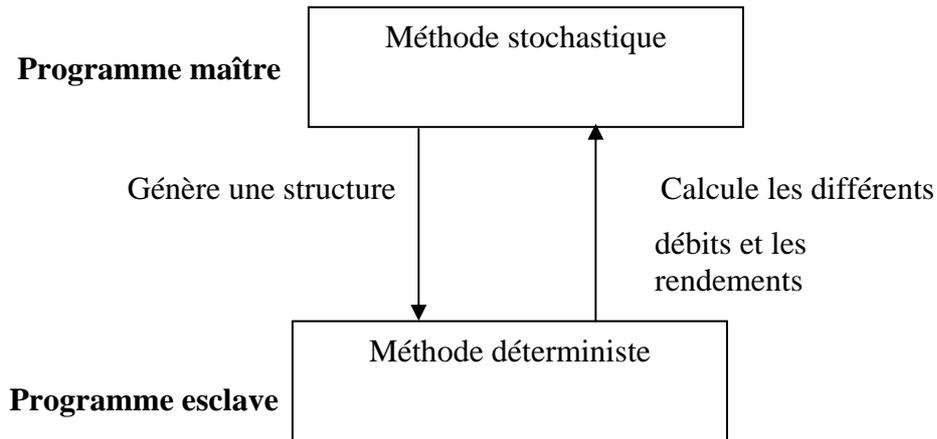


Figure I.12 : Schéma de fonctionnement de la démarche hybride.

La démarche de la méthode hybride repose sur une combinaison de deux méthodes appartenant chacune à une des classes de méthodes citée précédemment, stochastique et déterministe. Selon l'ensemble des méthodes choisies initialement, leurs stratégies de résolution sont les mêmes suivant leur définition initiale ; Seule une combinaison des deux est effectuée pour améliorer les résultats. Dans le cas particulier de l'identification de modèles, la mise en oeuvre de méthodes hybrides peut se faire selon deux voies différentes [24].

▪ Solution sans superstructure

Pour identifier le réseau, plusieurs études utilisent des méthodes stochastiques sans décrire l'ensemble des solutions possibles. Dans ce cas la stratégie de résolution est basée sur un programme maître qui propose une structure (ou un réseau) au programme esclave. Le programme maître implique une méthode stochastique, tandis que le programme esclave est basé sur une méthode d'optimisation classique pour optimiser les variables opératoires continues (débit, volume, etc) en fonction de chaque réseau proposé. Cette stratégie nécessite une méthode pour détecter les solutions non faisables de la structure proposée par la méthode stochastique. Cette détection basée, le plus souvent sur les concepts physiques, est fortement liée au problème et pénalisée par son manque de généralité. Dans ce cas, des données expérimentales sont nécessaires [24].

▪ Solution avec superstructure

Une autre méthode consiste à utiliser une procédure stochastique pour extraire des solutions potentielles de la superstructure. Le principal avantage est que la dimension du problème (en terme de nombre des variables et des contraintes) est constante et que toutes les solutions proposées par la méthode stochastique sont faisables. De plus, la superstructure est définie à partir de l'ensemble des solutions possibles correspondant au problème à modéliser. Rappelons que cette approche n'est pas universelle, dans la mesure où la qualité de la solution obtenue dépend de la formulation de la superstructure. Si des solutions particulières ne peuvent pas être générées à partir de la superstructure, elles ne peuvent pas être prises en compte par la méthode d'optimisation.

Néanmoins, bien que ces méthodes aient prouvé une bonne efficacité avec l'obtention de résultats très corrects, l'optimum global n'est pas assuré. Dans les deux cas d'études, l'initialisation des variables qui s'effectue aléatoirement pose souvent problème pour l'obtention d'une solution de bonne qualité. Il n'existe pas de méthodologie générale permettant de s'affranchir de la contrainte due à l'initialisation des variables [24, 10].

D'après la littérature, Il existe d'autres techniques de synthèse des réseaux d'échangeurs de chaleur : technique de décomposition, heuristique, évolutionnaires, etc.

▪ Technique de décomposition

La difficulté principale, associée aux problèmes de synthèse est le nombre énorme d'arrangements des équipements qui existe dans la majorité des sites industriels.

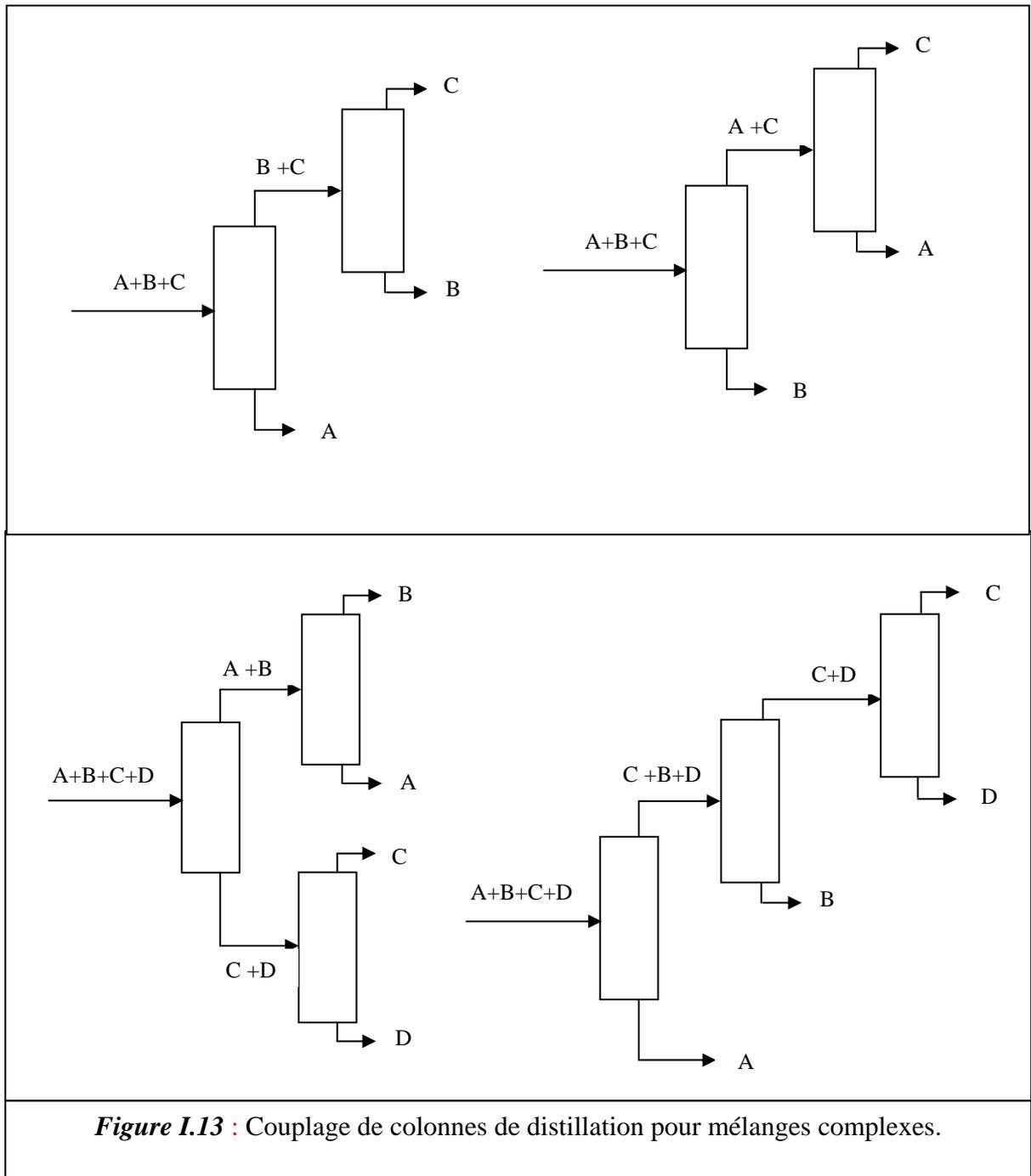
L'examen de chacun de ces arrangements n'est pas possible et les techniques conventionnelles d'optimisation désignées pour manipuler les variables discrètes ne peuvent résoudre que des petits problèmes. Pour résoudre ce problème on utilise une technique basée sur la décomposition du problème en sous problèmes.

Généralement, l'approche mathématique séquentielle est basée sur la technique de décomposition [07].

▪ Technique heuristique

C'est une méthode basée sur la résolution du problème par des moyens vraisemblables (probables). Les règles heuristiques sont très courantes en pratique du génie chimique. Cette technique est souvent combinée avec d'autres techniques [07].

Ainsi, la séparation de mélanges complexes implique la méthode heuristique dans le couplage et l'arrangement de colonnes de distillation. Il va de soi que la séparation d'un mélange de trois constituants implique la combinaison de deux colonnes au plus. Ce nombre atteint d'innombrables colonnes si le nombre de constituants dépasse huit. La mise en pratique de colonnes est exclusivement fondée sur la méthode heuristique donc purement combinatoire.



▪ Synthèse par optimisation directe

Les techniques d'optimisation sont actuellement appliquées à la synthèse des réseaux d'échangeurs de chaleur. Ces techniques englobent la programmation linéaire, la programmation dynamique et la programmation non linéaire, etc. [07].

▪ Techniques évolutionnaires

La synthèse évolutionnaire se rapporte à la synthèse d'un nouveau système par modification du précédent. King, Gantz et Barnes ont appliqué cette technique pour la synthèse d'une installation de production de l'éthylène dans lequel des améliorations successives ont été réalisées pour réduire les pertes d'éthylène dans l'atmosphère [07].

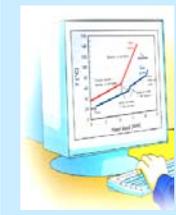
Conclusion

Les problèmes qui se posent dans les méthodes simultanées sont la complexité du modèle et la difficulté d'atteindre la solution optimale.

La méthode du pincement de température est facilement utilisable, mais on ne peut pas atteindre la configuration optimale. Elle ne prend pas en considération la dégradation de la qualité d'énergie dans l'échangeur en tenant compte de l'irréversibilité due au transfert de chaleur (gradient de température) ainsi que celle associée aux pertes de charge (effet visqueux).

Ainsi, la méthode du pincement de température traditionnelle est basée sur des considérations essentiellement économiques. L'objectif de cette méthode est d'obtenir le réseau d'échangeurs économiquement optimal (par exemple : un réseau au coût annuel minimum).

Aussi bien sur le plan énergétique et économique, on pense que l'introduction de la fonction exergie et que l'exploitation du critère de l'irréversibilité minimale. C'est dans cet objectif qu'on abordera dans le reste de ce travail une telle approche appliquée à la conception du réseau d'échangeurs de chaleur optimal.



Chapitre II

Analyse du fonctionnement d'un échangeur de chaleur

II.1. Introduction

Dans les installations industrielles, il est généralement nécessaire d'apporter une quantité de chaleur importante à une partie du système. Dans la majorité des cas, la chaleur est transmise à travers un échangeur de chaleur. On estime à 90 % la part des transferts d'énergie réalisée par les échangeurs de chaleur dans l'industrie.

Un échangeur de chaleur (heat exchanger) standard est un dispositif qui permet "d'échanger de la chaleur" entre deux fluides que l'on ne veut pas mélanger et qui ont des températures différentes.

Souvent, la dégradation partielle de l'énergie transférée par effets conductif, visqueux affecte la performance d'échange thermique. En fonction du sens de l'écoulement relatif des fluides mis en contact par l'entremise de la surface de contact, on distingue :

- Echangeur à contre-courant.
- Echangeur à co-courant.
- Echangeur à courants croisés.

Ces derniers continuent à occuper certaines unités (industries agroalimentaires, pharmaceutiques), les premières s'imposent de par leurs performances élevées dans des conditions identiques. Toutefois, l'analyse du fonctionnement thermique est plus basée sur l'étude des échangeurs à contre courant. A titre d'exemple, on cite les applications des échangeurs dans les divers domaines :

- La ventilation des bâtiments / air conditionné.
- Les radiateurs d'appartements et de moteurs de véhicules.
- Les échangeurs de chaleur (centrale nucléaire/ thermique).

II.2. Principaux types d'échangeurs de chaleur

L'échange thermique occupe une place très particulière dans les différents domaines de l'industrie. En fonction des propriétés des fluides à mettre en contact et de l'objectif escompté de l'opération, les échangeurs thermiques sont classés principalement en trois catégories :

- **Les échangeurs par mélange** : l'échange thermique a lieu par mélange direct des deux fluides pour obtenir un mélange à une température intermédiaire. On peut citer dans cette classe, les désurchauffeurs de vapeur ; les ballons de détente de purges.
- **Les échangeurs discontinus** : L'échange thermique s'effectue de sorte que la surface d'échange est alternativement mise en contact avec le fluide froid et le fluide chaud. L'exemple classique de telle classe est le réchauffeur d'air rotatif dans les centrales thermiques.
- **Les échangeurs continus** : Dans cette catégorie qui est la plus importante en raison de ses nombreuses applications industrielles, les deux fluides circulent de manière continue de part et d'autre de la surface d'échange. Selon la géométrie de cette surface d'échange, on distinguera les échangeurs tubulaires et les échangeurs à plaques [25].

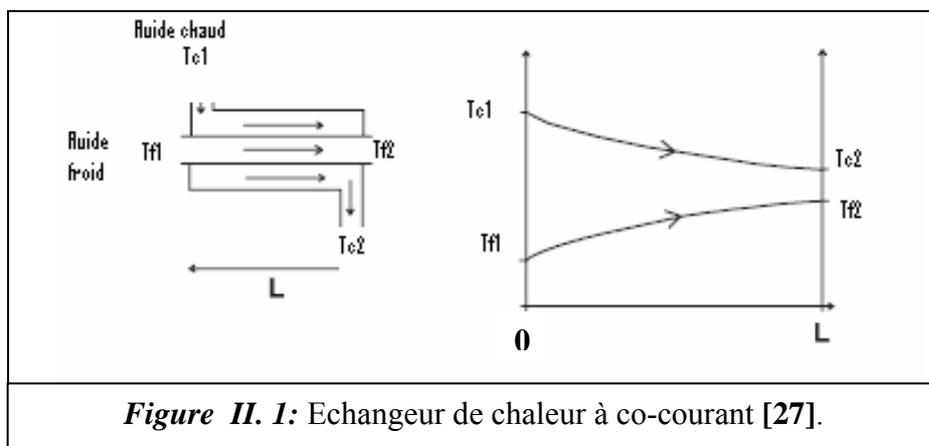
II.3. Configurations géométriques

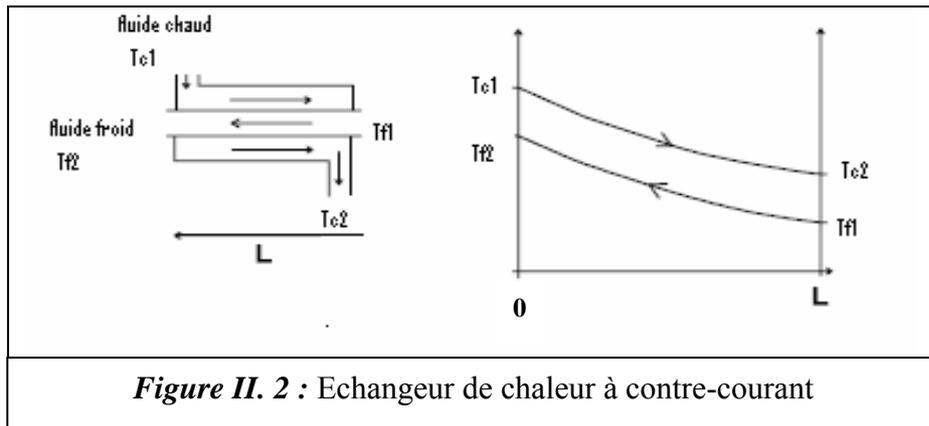
Les principales configurations d'échangeurs de chaleur sont présentées ci-dessous :

II.3.1. Echangeurs tubulaires coaxiaux

Un échangeur tubulaire simple est constitué de deux tubes cylindriques coaxiaux. L'un des fluides circule dans le tube central tandis que l'autre circule dans l'espace annulaire entre les deux tubes. Le transfert de chaleur du fluide chaud au fluide froid s'effectue à travers la paroi qui constitue le tube intérieur. Deux types de circulation sont possibles :

- Circulation à courants parallèles ou co-courant (ou antiméthodique)
- Circulation à contre-courant (ou méthodique) [27].



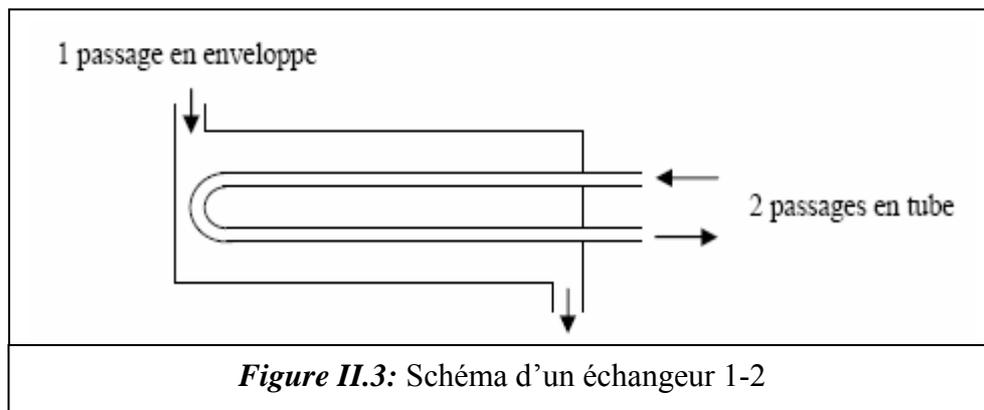


II.3.2. Echangeurs à faisceaux complexes

Il est toutefois difficile avec l'échangeur tubulaire simple d'obtenir des surfaces d'échange importantes sans aboutir à des appareils très encombrants. C'est l'une des raisons qui a conduit à développer d'autres géométries d'échanges.

- **Echangeur 1-2**

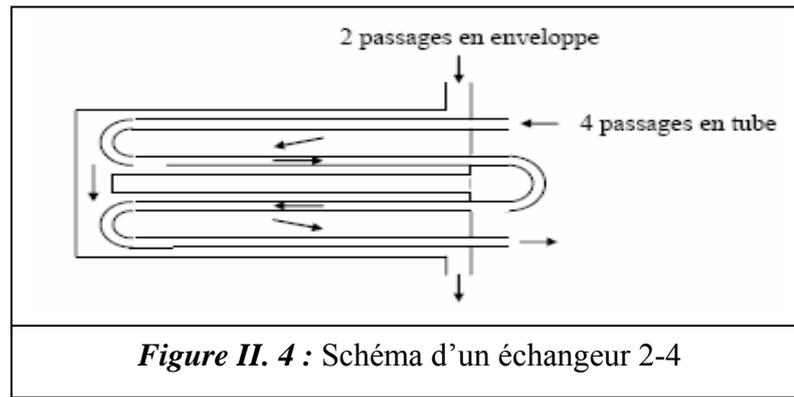
C'est l'échangeur à faisceau le plus simple. Le fluide circulant dans l'enveloppe (calandre) effectue un seul passage tandis que le fluide circulant dans le tube effectue 2 (ou $2n$) passages :



Une passe en tube s'effectue à co-courant avec l'écoulement en calandre tandis que l'autre s'effectue à contre courant [28].

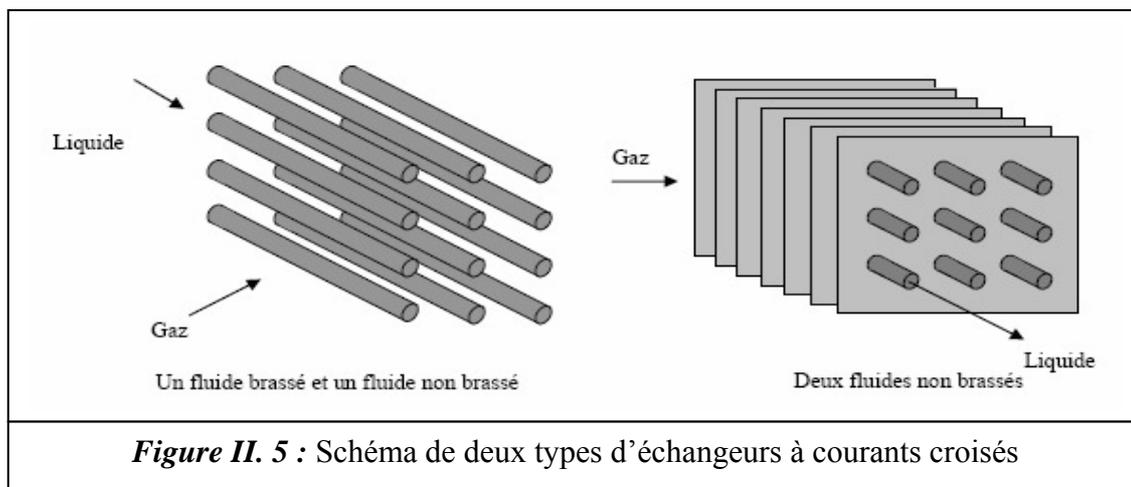
- **Echangeur 2-4**

Lorsque l'échangeur 1-2 ne permet pas d'obtenir une efficacité supérieure à 0,75. On cherche à se rapprocher d'avantage de l'échangeur à contre courant en effectuant 2 (ou plus) passages dans le côté calandre. L'échangeur 2-4 comporte une chicane longitudinale de sorte que le fluide en enveloppe effectue 2 passages. Le fluide dans le tube effectue 4 (ou $4n$) passages [28].



II.3.3. Echangeurs à courants croisés

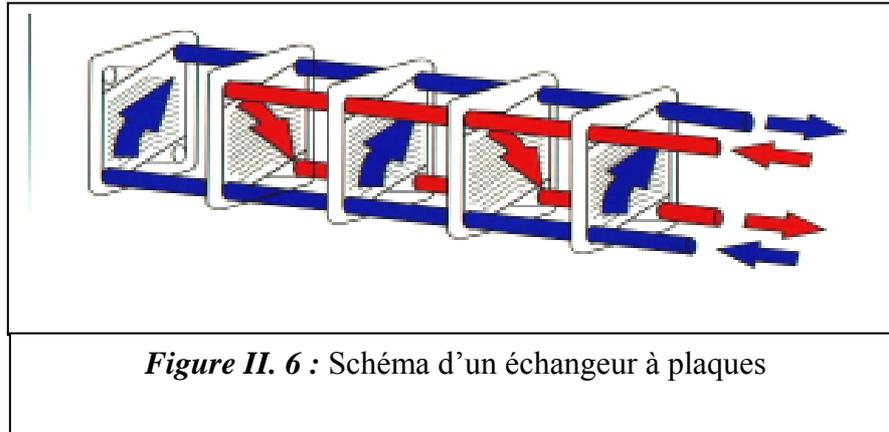
Les deux fluides s'écoulent perpendiculairement l'un à l'autre. Un fluide est dit non brassé s'il s'écoule dans une veine divisée en plusieurs canaux parallèles distincts et de faible section, il est dit brassé dans le cas contraire. Le brassage a pour effet d'homogénéiser les températures dans la section droite de la veine. Les échangeurs à courants croisés sont surtout utilisés pour des échangeurs entre un gaz circulant en calandre et un liquide circulant dans les tubes [28] :



II.3.4. Echangeurs à plaques

Les échangeurs à plaques sont constitués de plaques formées dont les alvéoles constituent les chemins empruntés par les fluides. Les plaques sont assemblées de façon à ce que le fluide puisse circuler entre elles. La distribution des fluides entre les plaques est assurée par un jeu de joints de telle sorte que chacun des deux fluides soit envoyé alternativement entre deux espaces inter plaques successifs. Les fluides peuvent ainsi échanger de la chaleur à travers les plaques.

L'avantage principal de ce type d'échangeur est la compacité. En effet, on voit bien que ce dispositif permet une grande surface d'échange dans un volume limité, ce qui est particulièrement utile lorsque des puissances importantes doivent être échangées. Les échangeurs à plaques sont très utilisés dans l'industrie agroalimentaire (pasteurisation du lait) ou l'industrie nucléaire [26, 28].



II.4. Méthodes de calcul des échangeurs de chaleur

Deux types de calcul sont envisagés pour caractériser l'échangeur de chaleur :

- Détermination de la surface d'échange (A) connaissant la puissance échangée et les températures d'entrée et de sortie des deux fluides.
- Détermination des températures de sortie des fluides, à partir de leurs températures d'entrée et de la surface d'échange. [26]

II.4.1. Méthode de la moyenne logarithmique de la différence de température (MLDT)

Un changeur tubulaire simple est constitué de deux tubes cylindriques coaxiaux.

Un fluide (généralement le fluide chaud) circule dans le tube intérieur. L'autre, dans l'espace annulaire compris entre les deux tubes. Le transfert de chaleur du fluide chaud au fluide froid s'effectue à travers la paroi qui constitue le tube intérieur.

Le fluide chaud entre dans l'échangeur à la température T_c^1 et en sort à T_c^2 . Le fluide froid entre à T_f^1 et sort à T_c^2 . Le flux de chaleur peut être évalué de différentes manières :

- Pour toute la longueur de l'échangeur, on a :

$$\phi = UA (T_c - T_f) \dots\dots\dots (II.1)$$

- Le transfert de chaleur dans une portion d'échangeur de longueur dx et une section dA :

$$d\phi = U (T_c - T_f) dA \dots\dots\dots (II.2)$$

- Perte de chaleur par le fluide chaud :

$$d\phi = -\dot{m}_c \cdot Cp_c \cdot dT_c \dots\dots\dots (II.3)$$

- Gain de chaleur par le fluide froid :

$$d\phi = \dot{m}_f \cdot Cp_f \cdot dT_f \dots\dots\dots (II.4)$$

D'après les deux dernières équations, on peut écrire :

$$\left\{ \begin{array}{l} dT_c = -\frac{d\phi}{\dot{m}_c \cdot Cp_c} \\ dT_f = \frac{d\phi}{\dot{m}_f \cdot Cp_f} \end{array} \right.$$

Par différence :

$$d(T_c - T_f) = -d\phi \left[\frac{1}{\dot{m}_c \cdot Cp_c} + \frac{1}{\dot{m}_f \cdot Cp_f} \right] \dots\dots\dots (II.5)$$

Soit en remplaçant $d\phi$ par son expression :

$$d(T_c - T_f) = -A(T_c - T_f) \left[\frac{1}{\dot{m}_c \cdot Cp_c} + \frac{1}{\dot{m}_f \cdot Cp_f} \right] dA$$

$$\Rightarrow d \frac{(T_c - T_f)}{(T_c - T_f)} = -U \left[\frac{1}{\dot{m}_c \cdot Cp_c} + \frac{1}{\dot{m}_f \cdot Cp_f} \right] dA \dots\dots\dots (II.6)$$

Par intégration, nous obtenons :

$$\log \left(\frac{T_c^2 - T_f^2}{T_c^1 - T_f^1} \right) = -U \left[\frac{1}{\dot{m}_c \cdot Cp_c} + \frac{1}{\dot{m}_f \cdot Cp_f} \right] A \dots\dots\dots (II.7)$$

D'après les équations :

$$\log \left(\frac{T_c^2 - T_f^2}{T_c^1 - T_f^1} \right) = -U \left[\frac{1}{\dot{m}_c \cdot Cp_c} + \frac{1}{\dot{m}_f \cdot Cp_f} \right] A$$

$$\text{et : } \phi = \dot{m}_f \cdot Cp_f \cdot (T_f^2 - T_f^1) = \dot{m}_c \cdot Cp_c \cdot (T_c^1 - T_c^2)$$

On a :

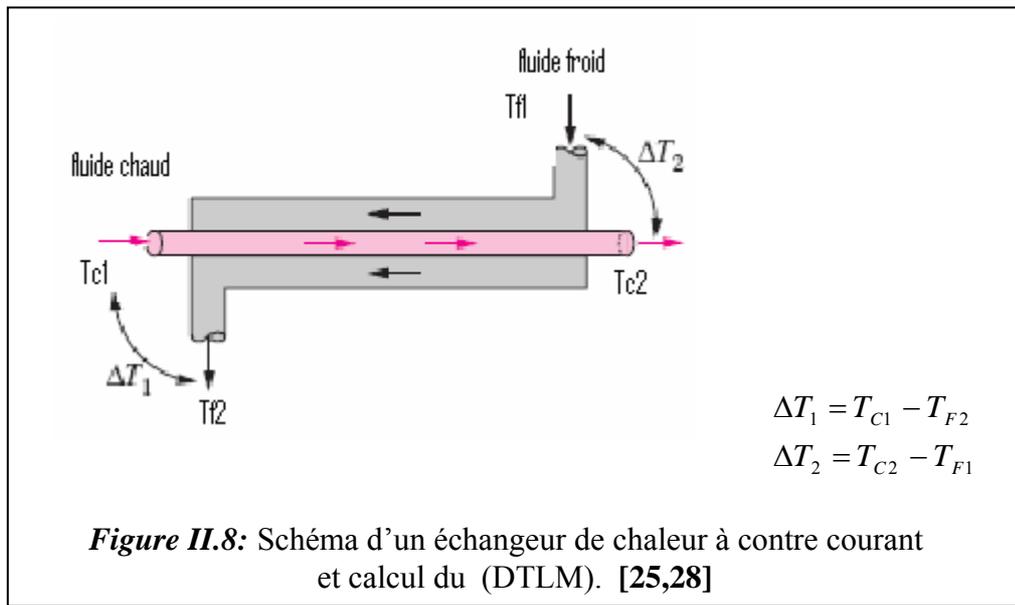
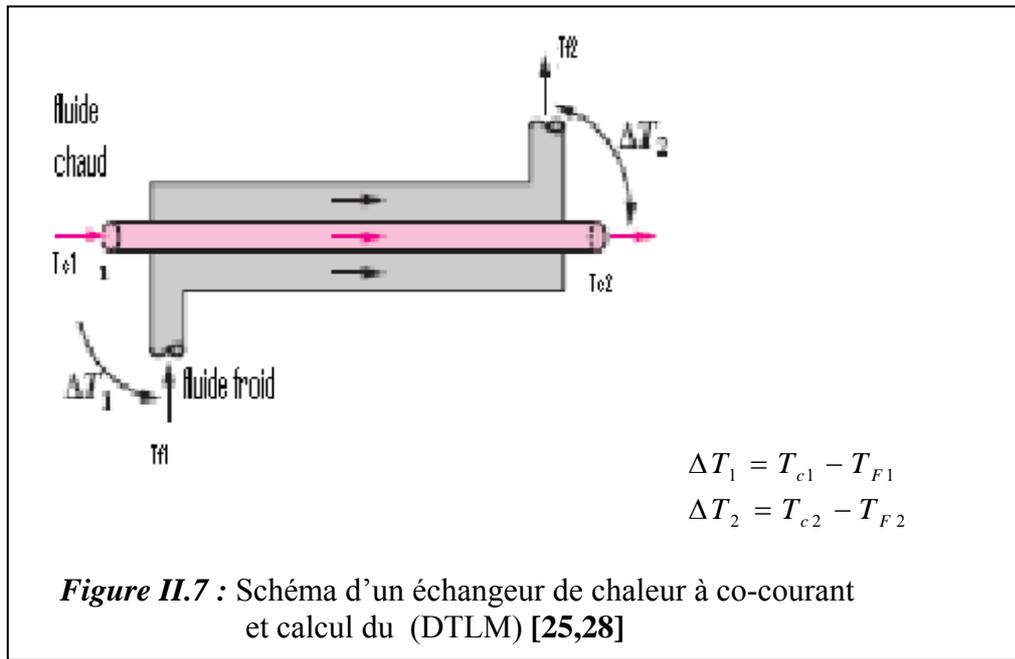
$$\phi = U . A . (\Delta T)_{ln} \dots\dots\dots (II.8)$$

avec :

$$(\Delta T)_{ln} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\log \left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right)} \dots\dots\dots (II.9)$$

[25, 26]

Calcul de ΔT_{Lm} pour les deux modes de fonctionnement :



▪ **Efficacité d'un échangeur**

On définit l'efficacité d'un échangeur comme le rapport du flux de chaleur effectivement transféré dans l'échangeur au flux de chaleur maximal qui serait transféré dans les mêmes conditions de températures d'entrée des deux fluides dans un échangeur tubulaire de longueur infinie fonctionnant à contre-courant [28] :

$$\eta = \frac{\phi}{\phi_{\max}} \dots\dots\dots (II.10)$$

▪ **Calcul du flux de chaleur maximal ϕ_{\max}**

La distribution des températures dans un échangeur à contre- courant présente l'une des allures suivantes :

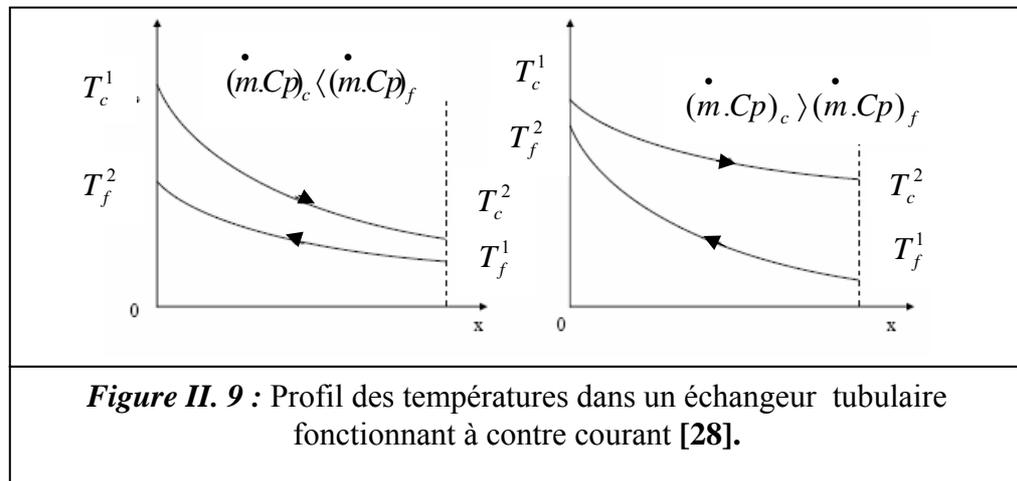


Figure II. 9 : Profil des températures dans un échangeur tubulaire fonctionnant à contre courant [28].

Le flux de chaleur maximal est calculé par l'équation suivante :

$$\phi_{\max} = (\dot{m}.Cp)_{\min} \cdot (T_c^1 - T_f^1) \dots\dots\dots (II.11)$$

- Si $(\dot{m}.Cp)_{\min} = (\dot{m}.Cp)_c$:

$$\phi_{\max} = (\dot{m}.Cp)_c \cdot (T_c^1 - T_f^1)$$

$$\phi = (\dot{m}.Cp)_c \cdot (T_c^1 - T_c^2)$$

Alors l'efficacité est définie par:

$$\eta = \frac{T_c^1 - T_c^2}{T_c^1 - T_f^1} \dots\dots\dots (II.12)$$

▪ Si $(\dot{m}.Cp)_{\min} = (\dot{m}.Cp)_f$:

$$\phi_{\max} = (\dot{m}.Cp)_f \cdot (T_c^1 - T_f^1)$$

$$\phi = (\dot{m}.Cp)_f \cdot (T_f^2 - T_f^1)$$

L'efficacité est décrite par la relation suivante :

$$\eta = \frac{T_f^2 - T_f^1}{T_c^1 - T_f^1} \dots\dots\dots (II.13)$$

I.4.2. Méthode du nombre d'unités de transfert (NUT)

Rapport de déséquilibre : c'est le rapport des débits thermiques soit :

$$R = \frac{\left(\dot{m} Cp \right)_f}{\left(\dot{m} Cp \right)_c} \dots\dots\dots (II.14)$$

Nombre d'unités de transfert :

On appelle nombre d'unités de transfert, le nombre sans dimension :

$$NUT = \frac{U.A}{\dot{m}.Cp} \dots\dots\dots (II.15)$$

On distingue le nombre d'unités de transfert du côté chaud :

$$NUT_c = \frac{U.A}{\left(\dot{m}_c . Cp_c \right)} \dots\dots\dots (II.16)$$

et de même le nombre d'unités de transfert du côté froid :

$$NUT_f = \frac{U.A}{\left(\dot{m}_f . Cp_f \right)} \dots\dots\dots (II.17)$$

Dans la pratique, seul le NUT correspondant au débit thermique minimum est utile.

On le notera NUT sans préciser d'indice :

$$NUT = \frac{U.A}{\left(\dot{m}.Cp \right)_{\min}} \dots\dots\dots (II.18)$$

L'idée de la méthode du NUT consiste à exprimer l'efficacité η de l'échangeur en fonction des deux paramètres R et NUT pour chaque configuration d'échangeur.

On dispose alors d'une fonction générale indépendante des conditions particulières de température ou de débit qui permettent de calculer rapidement les flux mis en jeu sans connaître les températures de sortie.

Dans ce cas, il suffit de calculer R puis le NUT puisqu'on connaît les caractéristiques de l'échangeur et les débits ce qui permet de calculer η à partir de l'équation :

$$\eta = \frac{1 - \exp(-NUT(1-R))}{1-R} \dots\dots\dots (II.19)$$

Il ne reste plus qu'à calculer le flux par l'équation :

$$\phi = \eta \cdot \phi_{\max} \dots\dots\dots (II.20)$$

Les températures de sortie arrivent ensuite par les équations suivantes :

$$\phi_c = \dot{m}_c C_{p_c} (T_c^2 - T_c^1) \dots\dots\dots (II.21)$$

$$\phi_f = \dot{m}_f C_{p_f} (T_f^2 - T_f^1) \dots\dots\dots (II.22) \quad [26]$$

▪ Calcul du coût d'un échangeur de chaleur

Le coût d'un échangeur de chaleur est calculé à partir d'une fonction linéaire de la surface d'échange de chaleur, par exemple le coût d'investissement d'un échangeur de chaleur est calculé à partir de la relation suivante :

$$C_{out} = c(A)^b f_1 f_2 f_3 f_4 \dots\dots\dots (II.23)$$

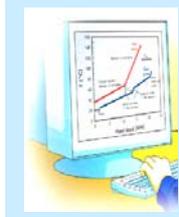
Avec :

A : la surface d'échange.

c et b sont des constantes ($0.6 \leq b \leq 0.8$).

f_i : sont des coefficients qui dépendent de :

- Traitement chimique de la surface.
- Nature du matériau constitutif de l'échangeur.
- Dimension de l'échangeur.
- Pression de fonctionnement [27].



Chapitre III

Application du concept de l'exergie à l'analyse
du fonctionnement d'un échangeur de chaleur

III.1. Introduction

Pour concevoir et optimiser un procédé industriel, on utilise des méthodes découplées, qui font appel à l'efficacité énergétique et/ou à d'autres grandeurs physiques relatives à l'étude économique. Cette méthodologie est objectivement délicate à mettre en oeuvre car elle conduit, dans de nombreux cas, à privilégier l'un des critères au détriment de l'autre. Pour les aspects énergétiques, le seul objectif des concepteurs est la minimisation de la "consommation" d'énergie. Pour cela, on fait appel au concept du rendement énergétique des systèmes qui est défini comme le rapport entre l'énergie fournie par le système et l'énergie utilisée pour produire l'effet désiré. Ces énergies peuvent être de types différents (chimique, thermique, mécanique, électrique, etc.). Cette démarche est basée sur l'application du premier principe de la thermodynamique (bilan enthalpique).

Cependant, on sait que le premier principe ne prend en compte que les quantités d'énergie échangées ainsi que leurs formes sans se référer pour autant à la qualité qui est fondamentalement associée au deuxième principe de la thermodynamique. La combinaison des deux principes dans les analyses du fonctionnement des systèmes est particulièrement riche en enseignements.

III.2. Principe du calcul exergétique

La théorie de l'exergie a pour objet de fournir un cadre tout à fait rigoureux pour quantifier la qualité thermodynamique de l'énergie par rapport à un état de référence, souvent dit état mort. C'est dans cette optique que G. Gouy a introduit la notion d'énergie utilisable (Available Energy) laquelle est synonyme du terme exergie. Ce concept a été développé dans le but de proposer une méthode d'analyse intégrée reposant sur les deux premiers principes de la thermodynamique. L'idée de base est de considérer que le système thermodynamique interagit avec son environnement. Ce dernier se comporte comme un réservoir infini à température et pression constantes et de composition fixée pour qu'il ne soit pas perturbé lors de ses interactions avec le système [34, 44].

III.2. 1. Définition de l'exergie

La littérature abonde en matière de définitions de l'exergie d'un système. Il semble que la définition la plus rigoureuse peut être énoncée comme suit :

L'exergie est la grandeur thermodynamique non conservative qui quantifie le travail maximal que l'on peut extraire d'un système, quand celui-ci passe d'un état initial à un état d'équilibre avec le milieu ambiant. Il y a lieu de noter que lors de ce passage, le système interagit de façon permanente avec le milieu environnant [29]. Il en découle que l'exergie est une fonction d'état qui dépend de la température, de la pression et de la composition chimique du courant [34].

III.2.2. Définition de l'état ambiant

Le milieu ambiant d'un système est un milieu relativement vaste, supposé dans un état d'équilibre thermodynamique parfait de sorte qu'il ne soit pas siège de gradients des paramètres intensifs (pression, température et potentiel chimique). En conséquence, tout autre système extérieur ayant un ou plusieurs paramètres intensifs qui diffèrent de ceux du milieu ambiant a le potentiel de production du travail. Ainsi, le milieu ambiant d'un système donné est le milieu de référence pour établir le potentiel de production (ou de réception) de travail de ce système. De ce fait, le milieu ambiant est considéré comme étant source (ou puits) d'énergie interne. Cette dernière pouvant être librement soustraite (ou ajoutée) sans qu'il y ait de variation des propriétés intensives du milieu [30].

III.3. Calcul de l'exergie d'un courant de matière

Identiquement à l'énergie, l'exergie d'un courant de matière peut être divisée en quatre composantes principales. En l'absence des effets nucléaire, magnétique et électrique, l'exergie peut s'exprimer par la relation suivante:

$$Ex = Ex_c + Ex_p + Ex_{ph} + Ex_{ch} \dots\dots\dots (III.1)$$

où : Ex_c , Ex_p , Ex_{ph} , Ex_{ch} sont respectivement l'exergie cinétique, l'exergie potentielle, l'exergie physique et l'exergie chimique. Souvent, dans la littérature, on introduit la notion de l'exergie spécifique, laquelle exprime l'exergie rapportée à l'unité de masse, dont la formulation est donnée par [31, 33, 36] :

$$e = e_c + e_p + e_{ph} + e_{ch} \dots\dots\dots (III.2)$$

III.3.1. Définition des composantes de l'exergie

Afin de s'en servir dans l'expression des bilans, il est impératif d'explicitier la définition de chaque composante de l'exergie. Dans ce sens, on note :

1) **Exergie cinétique (e_c) :** Puisque l'énergie cinétique est liée à la vitesse du fluide dans les conditions idéales, entièrement convertible en travail mécanique, l'exergie cinétique est égale à l'énergie cinétique où la vitesse est rapportée à la surface de la terre. Elle a pour expression :

$$e_c = \frac{V_0^2}{2} \dots\dots\dots \text{(III.3)}$$

avec V_0 la vitesse relative du courant fluide par rapport à la surface de la terre.

2) **Exergie potentielle (e_p) :** Par définition, l'exergie potentielle est égale à l'énergie potentielle où la hauteur (Z_0) est rapportée au niveau de la mer. Son expression est donnée par :

$$e_p = g \cdot Z_0 \dots\dots\dots \text{(III.4)}$$

où g est la gravitation terrestre ($\cong 9.81 \text{ m/sec}^2$).

3) **Exergie physique (e_{ph}) :** Elle représente le travail échangé par le système lorsqu'il subit une suite de transformations physiques réversibles depuis son état initial jusqu'à l'atteinte de l'état d'équilibre avec le milieu environnant.

$$e_{ph} = (H_1 - H_0) - T_0(S_1 - S_0) = \Delta H - T_0 \Delta S \dots\dots\dots \text{(III.5)}$$

avec T_0 et P_0 la température et la pression du milieu environnant, supposé un état mort. L'exergie physique est basée sur la température et la pression du courant de matière.

- Dans les ouvrages spécialisés et pour un gaz parfait de chaleur spécifique C_p constante, l'exergie physique est donnée par l'équation suivante :

$$e_{ph} = C_p(T - T_0) - T_0 \left(C_p \cdot \log\left(\frac{T}{T_0}\right) - R \cdot \log\left(\frac{P}{P_0}\right) \right) \dots\dots\dots \text{(III.6)}$$

- Pour les solides et les liquides qui se caractérisent par leur faible compressibilité, l'exergie physique est calculée par la relation :

$$e_{ph} = C_p \left[(T - T_0) - T \cdot \log\left(\frac{T}{T_0}\right) \right] - v_m (P - P_0) \dots\dots\dots \text{(III.7)}$$

Avec : v_m le volume spécifique.

4) Exergie chimique (e_{ch}) :

L'exergie chimique est égale à la quantité maximum de travail obtenue lorsque la substance étudiée est apportée de l'état environnemental à l'état mort (T_0, P_0, μ_{0i}) par des processus comportant le transfert thermique et l'échange des substances uniquement avec l'environnement. [31, 33, 36].

Pour le système des échangeurs de chaleur, on doit noter que les interactions chimiques entre les différents courants de matière et avec le milieu ambiant sont supposées nulles et par conséquent, le bilan exergétique ne comporte pas l'expression de cette composante .

▪ **L'exergie d'une quantité de chaleur**

L'exergie associée à un échange de l'énergie sous forme thermique avec le milieu environnant dépend essentiellement de son niveau de température. En effet, on remarque que si cette température est égale à la température du milieu ambiant, le potentiel de production de travail maximal échangeable est nul [33, 36, 31]. Précisément, le contenu exergétique d'une quantité de chaleur Q à la température T est calculé par la relation suivante :

$$E_x = Q \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \dots\dots\dots \text{(III.8)}$$

où $\left(1 - \frac{T_0}{T} \right)$ est le facteur de Carnot.

▪ **L'exergie liée au travail mécanique**

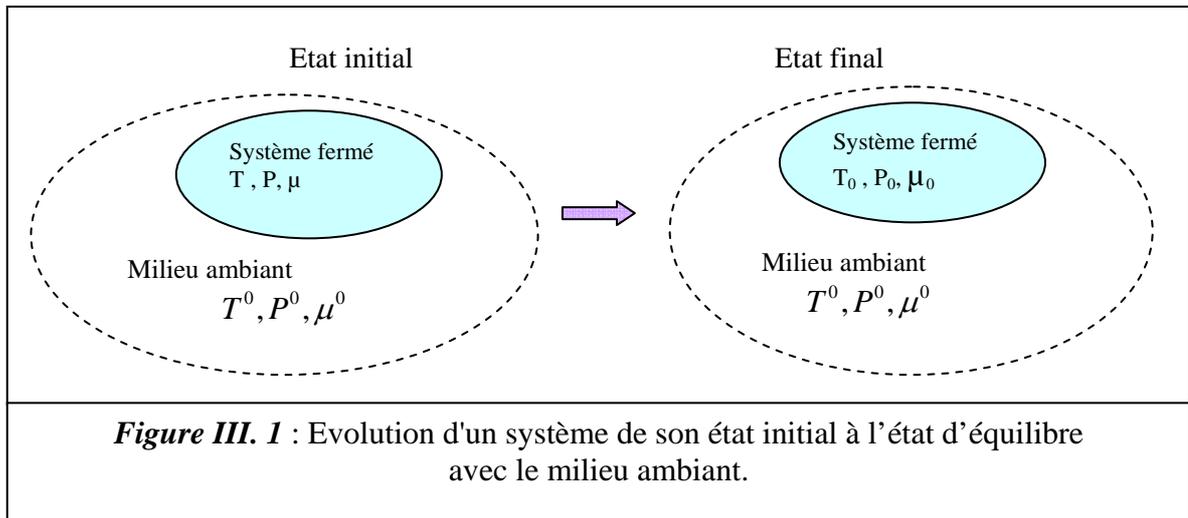
Parce que l'exergie est définie comme potentiel maximum de travail, le flux de travail échangé est équivalent au flux d'exergie transféré sous forme mécanique, soit : [33, 29]

$$E_x = W \dots\dots\dots \text{(III.9)}$$

▪ **Exergie d'un système quelconque**

Plusieurs définitions de l'exergie d'un système quelconque ont été énoncées. On retiendra la suivante : "l'exergie d'une certaine quantité de matière contenue dans un système est une mesure du potentiel de production d'un travail maximal par le supersystème (le supersystème constitué du système et de son milieu ambiant), qui permettra à cette quantité de matière d'être ramenée de son état initial à un état d'équilibre inerte avec le milieu ambiant" [35].

Considérons le système de la figure n°III.1 qui est initialement dans un état quelconque, caractérisé par son énergie E , son entropie S , son volume V , sa température T , sa pression P et son potentiel chimique μ . Comme ce système et son milieu ambiant ne sont pas en équilibre (thermique, mécanique et chimique), ces deux régions vont avoir des échanges de chaleur, de travail et de matière. [30]



Quelle est la différence entre l'énergie, l'exergie et l'anergie ?

L'exergie est une énergie définie comme étant « noble » telle que les énergies : électrique, mécanique, nucléaire et chimique, qui sont des énergies qui peuvent être exploitées sans avoir à subir des transformations préalables. L'énergie E est ainsi constituée d'une part d'énergie noble, l'exergie Ex , d'autre part, d'énergie complémentaire nommée l'anergie An . La relation entre l'énergie, l'exergie et l'anergie est donnée par : [30]

$$E = Ex + An \dots\dots\dots (III.10)$$

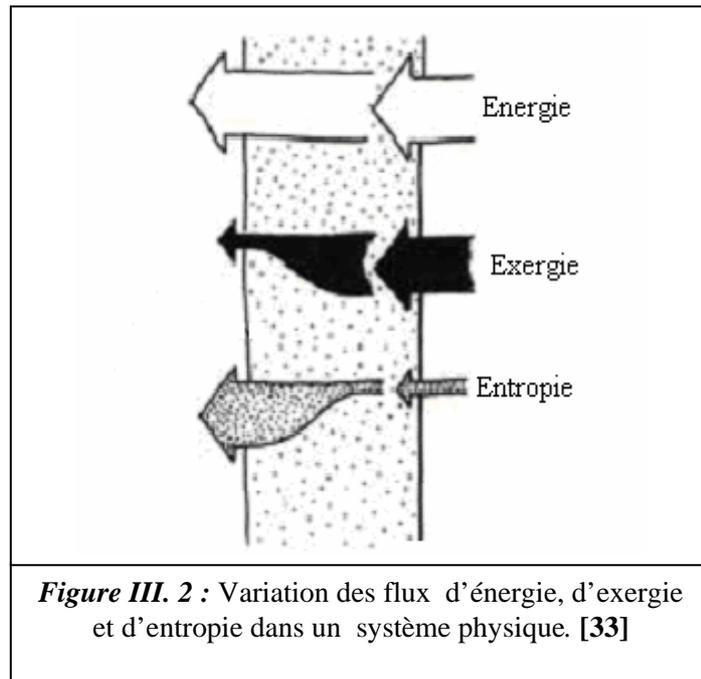
Ainsi que, l'anergie associée à l'échange thermique représente la partie complémentaire de l'exergie qui est non transformable en énergie noble. Elle a pour expression :

$$An_Q = Q \cdot \frac{T_0}{T} \dots\dots\dots (III.11)$$

Donc :

$$Q = Ex_Q + An_Q \dots\dots\dots (III.12)$$

La variation de l'énergie, l'exergie et l'entropie pour un système quelconque est représentée dans la figure n° III.2.



Selon le premier principe de la thermodynamique, la quantité d'énergie à l'entrée est égale à la quantité d'énergie à la sortie du système ; Par contre, l'entropie subit une augmentation lors de toute transformation thermodynamiquement possible. Compte tenu des irréversibilités de toute transformation réelle, le flux d'exergie subit une réduction d'après les postulats de la thermodynamique des processus irréversibles (T.P.I). Toutefois, si le bilan thermique est un principe qui permet de quantifier l'énergie nécessaire, le bilan exergétique est une seconde forme du bilan entropique pour le procédé qui conduit à l'analyse de la faisabilité thermodynamique d'une transformation. Donc, le bilan exergétique exprime le flux de dégradation de l'énergie dans tout système subissant une transformation thermodynamique.

III.3.2. Bilan exergétique sur un volume de contrôle

Le bilan exergétique est un rapport chiffré de la dégradation de l'énergie, qui est due aux irréversibilités de tous les processus réels. Dans les procédés industriels, les systèmes ouverts sont les plus largement utilisés par rapport aux systèmes fermés (ou discontinus). On applique le bilan exergétique pour un système ouvert à l'état d'équilibre. Ce système est présenté dans la figure n° III.3. Le bilan exergétique est énoncé aux frontières d'un volume de contrôle délimité par des bornes fictives abstraites.

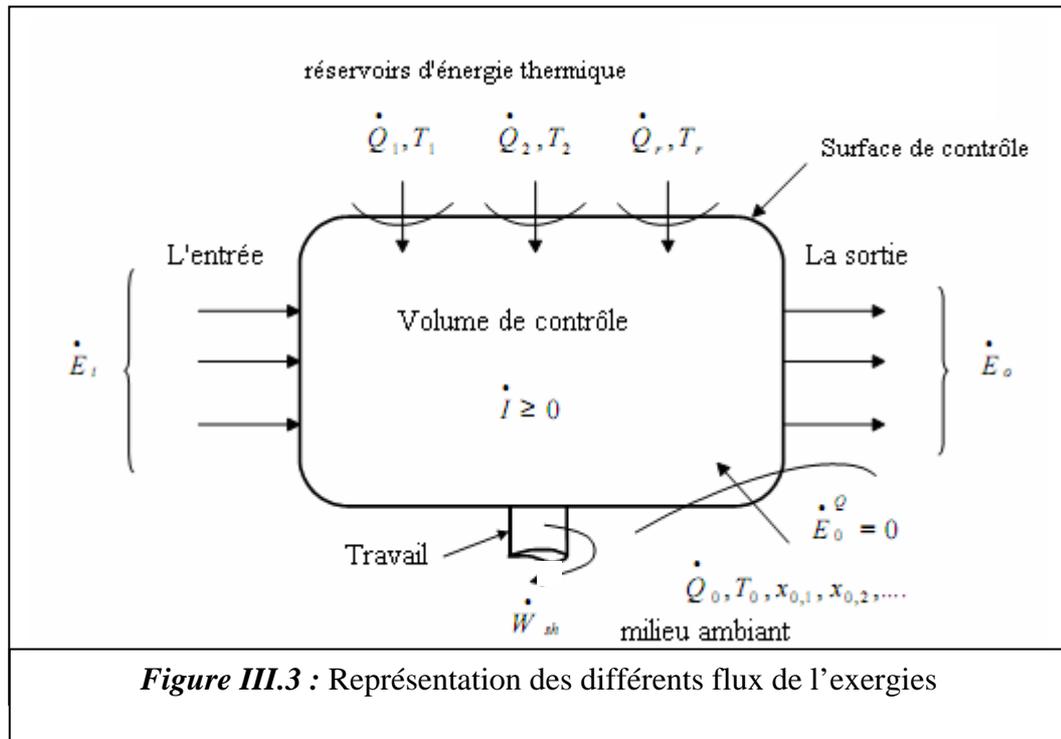


Figure III.3 : Représentation des différents flux de l'exergies

$$\dot{E}x_{ent} + \dot{E}^Q = \dot{E}_{sort} + \dot{W} + \dot{I} \dots\dots\dots (III.13)$$

Avec :

$$\dot{E}x_{ent} = \sum \dot{m}_{ent} \cdot e_{ent}$$

$$\dot{E}x_{sort} = \sum \dot{m}_{sort} \cdot e_{sort}$$

$$\dot{E}^Q = \sum \dot{Q}_r \left(1 - \frac{T_0}{T_r} \right)$$

L'exergie spécifique totale d'un courant de matière est écrite sous la forme :

$$e = (h - h_0) - T_0(s - s_0) + e_{ch} + \frac{V_0^2}{2} + g \cdot Z_0 \dots\dots\dots (III.14)$$

Le flux d'exergie à l'entrée du volume de contrôle est toujours plus grand que le flux d'exergie à la sortie. La différence entre les deux représente les pertes d'exergie ou destruction d'exergie, qui définit l'irréversibilité liée à la transformation. Elle est calculée à partir de la relation de Gouy-Stodola. Cette relation implique que l'irréversibilité d'un procédé égale au produit de la création d'entropie pour chaque système participant au procédé par la température du milieu ambiant (ou l'état de référence). Ainsi, on a : [33]

$$\dot{I} = T_0 (\Delta \dot{S}) = T_0 \left[\sum \dot{m}_{sort} \cdot S_{sort} - \sum \dot{m}_{ent} \cdot S_{ent} - \sum \frac{\dot{Q}_r}{T_r} \right] \dots \dots \dots \text{(III.15)}$$

Sous d'autre forme, elle s'écrit: [31]

$$\dot{I} = \sum_{entrée} Ex_{entrée} - \sum_{sortie} Ex_{sortie} \dots \dots \dots \text{(III.16)}$$

III.4. Calcul des irréversibilités dans un échangeur de chaleur

Les pertes exergetiques globales d'un échangeur de chaleur résultent des différentes irréversibilités créées pendant le fonctionnement de l'échangeur. Ces irréversibilités sont dues :

- 1) Au transfert de chaleur par conduction et convection
- 2) Aux pertes de charge lors de l'écoulement des fluides mis en contact thermique.

Elles s'écrivent: [31, 32]

$$\dot{I} = I^{\Delta T} + I^{\Delta P} \dots \dots \dots \text{(III.17)}$$

L'irréversibilité due au transfert de chaleur pour un échangeur à contre courant est :

$$I^{\Delta T} = T_0 \left[\dot{m}_f \cdot Cp_f \cdot \ln \frac{T_f^2}{T_f^1} + \dot{m}_c \cdot Cp_c \cdot \ln \frac{T_c^2}{T_c^1} \right] \dots \dots \dots \text{(III.18)}$$

L'irréversibilité due à la variation du pression (perte de charges) est : [31, 32]

$$I^{\Delta P} = \frac{\dot{m}_f}{\rho_f} (P_f^1 - P_f^2) + \frac{\dot{m}_c}{\rho_c} (P_c^1 - P_c^2) \dots \dots \dots \text{(III.19)}$$

▪ **L'efficacité rationnelle d'un échangeur de chaleur**

Pour caractériser la performance d'un échangeur de chaleur, Kotas définit l'efficacité exergetique rationnelle [29] par le rapport entre l'exergie recherchée (désirée) à l'exergie consommée dans le procédé. Ainsi, on a :

$$\Psi = \frac{\dot{E} x_{désirée}}{\dot{E} x_{consommée}} \dots \dots \dots \text{(III.20)}$$

Pour le fonctionnement de l'échangeur de chaleur, où le résultat est le chauffage du courant froid, on considère l'exergie désirée est égale à l'exergie associée à la variation de la température du courant froid :

$$\dot{E}x_{désiré} = \dot{E}x_f^{\Delta T} \dots\dots\dots (III.21)$$

$$\dot{E}x_f^{\Delta T} = \dot{E}x_{f,Sortie}^{\Delta T} - \dot{E}x_{f,entrée}^{\Delta T} \dots\dots\dots (III.22)$$

Le flux d'exergie consommée (ou l'exergie utilisée) peut être assimilée à la superposition des exergies liées à :

1. Exergie liée au courant chaud.
2. Exergie liée à la perte de charge dans le courant chaud.
3. Exergie liée à la perte de charge dans le courant froid.

Ainsi, on a :

$$\dot{E}x_{consommée} = \dot{E}x_c^{\Delta T} + \dot{E}x_c^{\Delta P} + \dot{E}x_f^{\Delta P} \dots\dots\dots (III.23)$$

Par conséquent, l'efficacité rationnelle est donnée par l'équation :

$$\Psi_{chauffage} = \frac{\dot{E}x_f^{\Delta T}}{\dot{E}x_c^{\Delta T} + \dot{E}x_c^{\Delta P} + \dot{E}x_f^{\Delta P}} \dots\dots\dots (III.24)$$

Nous mettons en évidence l'intérêt des analyses énergétique et exergetique pour l'analyse de la performance des installations suivantes :

 **Système sol - pompe à chaleur avec deux échangeurs de chaleur horizontaux :**

Dans cette application, nous étudions les efficacités énergétique et exergetique de système : sol- pompe à chaleur (GCHP: a ground-coupled heat pump) en fonction de la profondeur lequel est destiné au chauffage domestique. Il a été employé des échangeurs de chaleur horizontaux (HGHEs: horizontal ground heat exchangers) ; Le premier échangeur HGHE1 est entreposé à un mètre de profondeur et le deuxième échangeur HGHE2 est enfoui à une profondeur de deux mètres de la surface du sol. L'installation expérimentale se compose de trois éléments principaux : Les échangeurs de chaleur horizontaux :GHEs (ground heat exchangers), une pompe à chaleur (GCHP) et matériels annexes [36].

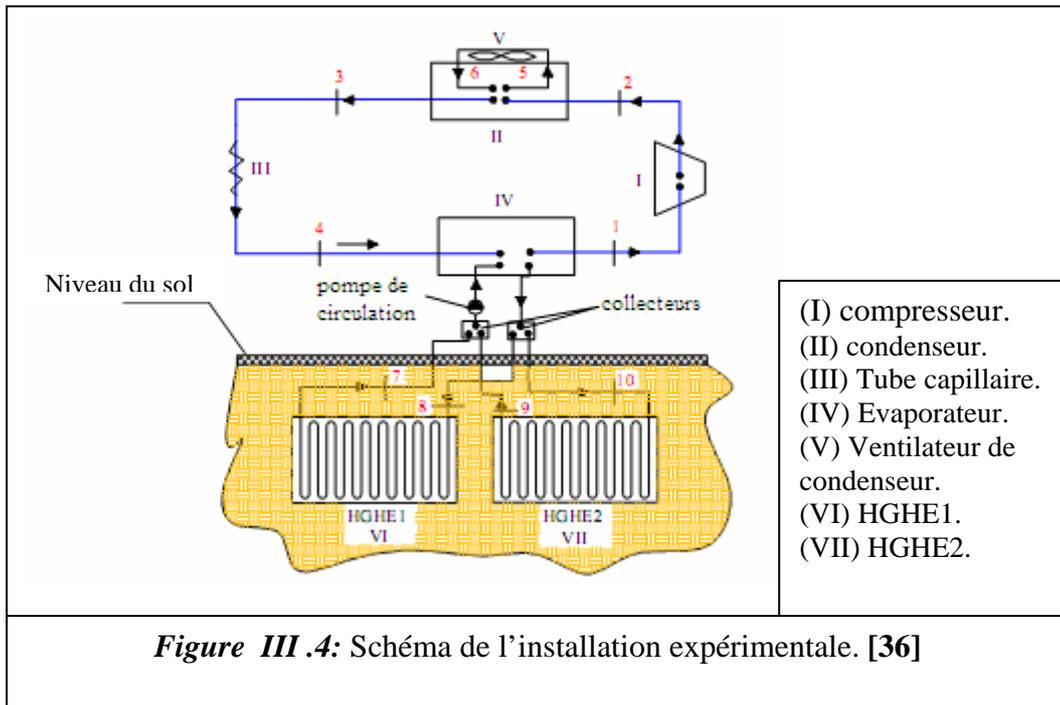


Figure III .4: Schéma de l'installation expérimentale. [36]

Les coefficients de performance des systèmes de GCHP obtenus sont de 2,5 et 2,8 respectivement, tandis que l'efficacité rationnelle exergetique du système global s'avère égale à 53,1% et 56,3% respectivement pour les deux échangeurs HGHE1 et HGHE2.

Tableau III .1 : Efficacités énergétique et exergetique des systèmes de GCHP.

	Profondeur [m]	Efficacité énergétique (COP)	Efficacité exergetique
HGHE1	1	2,5	53,1 %
HGHE2	2	2,8	56,3%

✚ Une colonne de distillation

Une colonne de distillation peut être décrite comme un convertisseur de l'exergie. L'exergie du courant d'alimentation est augmentée par la formation des courants des produits en utilisant l'exergie provenant d'une source de chaleur (utilité chaude). En d'autres termes, la colonne a améliorée la composition du flux d'exergie d'un courant de matière en consommant l'énergie thermique fournie par les sources extérieures de chaleur (Rebouilleur). Donc, une colonne de distillation peut être vue comme machine thermique où l'énergie d'une source chaude est transférée à un puits dont la température est plus basse. Les pertes d'exergie peuvent être calculées par un bilan exergetique global sur la colonne de distillation.

Le flux d'exergie entrant est donné par :

- 1) Exergie de l'alimentation de la colonne ;
- 2) Exergie associée à la quantité d'énergie fournie au rebouilleur.

Soit :

$$(Ex)_{ent} = Q_{reb} \left(1 - \frac{T_0}{T_{reb}} \right) + Ex_{a\ lim}$$

Par ailleurs, le flux d'exergie sortant de la colonne est la superposition de :

- 1) Exergie des flux de produits de distillat et du résidu;
- 2) Exergie associée à la quantité d'énergie reçue au condenseur.

Soit :

$$(Ex)_{sort} = -Q_{cond} \left(1 - \frac{T_0}{T_{cond}} \right) + Ex_{Dist} + Ex_{Rés}$$

Il en découle que le flux des irréversibilités dans la colonne est :

$$I = Q_{reb} \left(1 - \frac{T_0}{T_{reb}} \right) + Q_{cond} \left(1 - \frac{T_0}{T_{cond}} \right) + Ex_{a\ lim} - Ex_{Dist} - Ex_{Rés}$$

Par conséquent, on peut exprimer le flux des irréversibilités dans la colonne par la relation suivante :

$$I = (\Delta Ex)_{utils} - (\Delta Ex)_{courants}$$

Où :

$$(\Delta Ex)_{utils} = Q_{reb} \left(1 - \frac{T_0}{T_{reb}} \right) + Q_{cond} \left(1 - \frac{T_0}{T_{cond}} \right)$$

$$(\Delta Ex)_{courants} = Ex_{Rés} + Ex_{Dist} - Ex_{a\ lim}$$

Pour une colonne de distillation, l'exergie minimale de la séparation peut être donnée par la différence d'exergie entre l'alimentation et les courants des produits. Or, cette condition correspond à une colonne de distillation réversible et exige un nombre de plateaux infini. Les pertes d'exergie dans un plateau d'une colonne de distillation peuvent être calculées par l'exécution des bilans d'enthalpie et d'entropie d'une manière analogue à une colonne de distillation complète, c'est-à-dire des bilans sur les courants liquide et vapeur en interaction avec le plateau. En combinant les deux principes de la thermodynamique, les pertes d'exergie dans un plateau adiabatique peuvent être déterminées par l'équation suivante :

$$I = -T_0 (S_{vap,ent} + S_{liq,ent} - S_{vap,sort} - S_{liq,sort})$$

Les valeurs de l'entropie des courants peuvent être estimées par des simulateurs [37, 45].

On note que, dans une colonne de distillation l'efficacité exergetique varie en fonction du flux de l'alimentation, par exemple pour un flux d'alimentation de 140 kmol/hr l'efficacité exergetique prend la valeur 0,340 et les pertes d'exergie dépend également aux conditions de flux d'alimentation (composition, position de plateau, états physiques) [38].

Application à l'analyse d'un système solaire assisté par une pompe à chaleur :

L'installation est un système solaire assisté d'une pompe à chaleur (SAHP : solar-assisted heat pump) destinée au chauffage d'une salle composée de murs concrets et des fenêtres en verre dont la surface totale est de 60 m². Un schéma d'ensemble du système est montré dans la figure n°III .5. Le capteur solaire est orienté face au sud faisant un angle de 38° par rapport à l'horizontale. Pour éviter le givrage de l'eau dans les conditions de travail pendant la saison d'hiver, une solution à 30% en propylène glycol a été prévue alors que le fluide réfrigérant utilisé est le fréon R-22 . La chaleur absorbée par le capteur solaire est véhiculée au fluide caloporteur de la pompe à chaleur en circuit fermé [39].

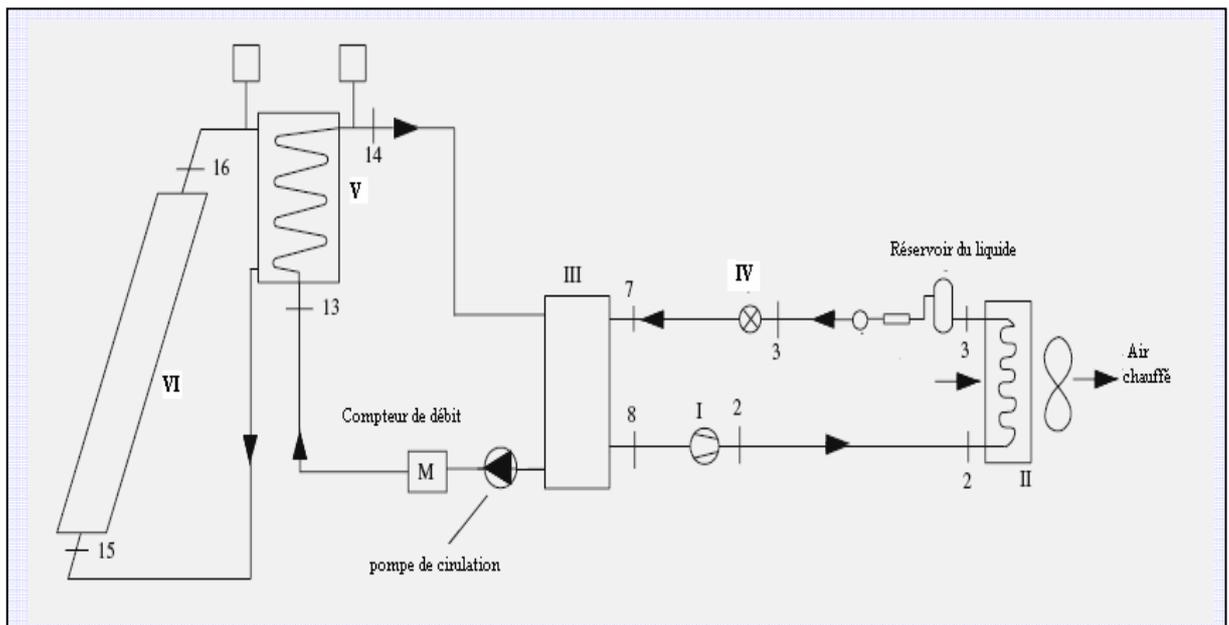


Figure III .5 : Schéma d'un système pompe à chaleur assistée d'un capteur solaire. [39]

- (I): Compresseur. (II): Condenseur. (III) : Evaporateur.
 (IV): Tube capillaire. (V): Echangeur de chaleur solaire. (VI) : Capteur solaire.

La chaleur est ainsi fournie au réfrigérant qui circule dans l'évaporateur de la pompe à chaleur. Ce réfrigérant traverse un cycle fermé dans la pompe à chaleur. Il s'évapore en

absorbant la chaleur de la solution eau-antigel de l'évaporateur pour être ensuite admis dans le compresseur. Le réfrigérant, comprimé au niveau du compresseur, est conduit dans le condenseur pour libérer la chaleur de condensation au milieu délimitant la salle. Cette chaleur s'y trouve propagée par l'entremise de ventilateurs [39].

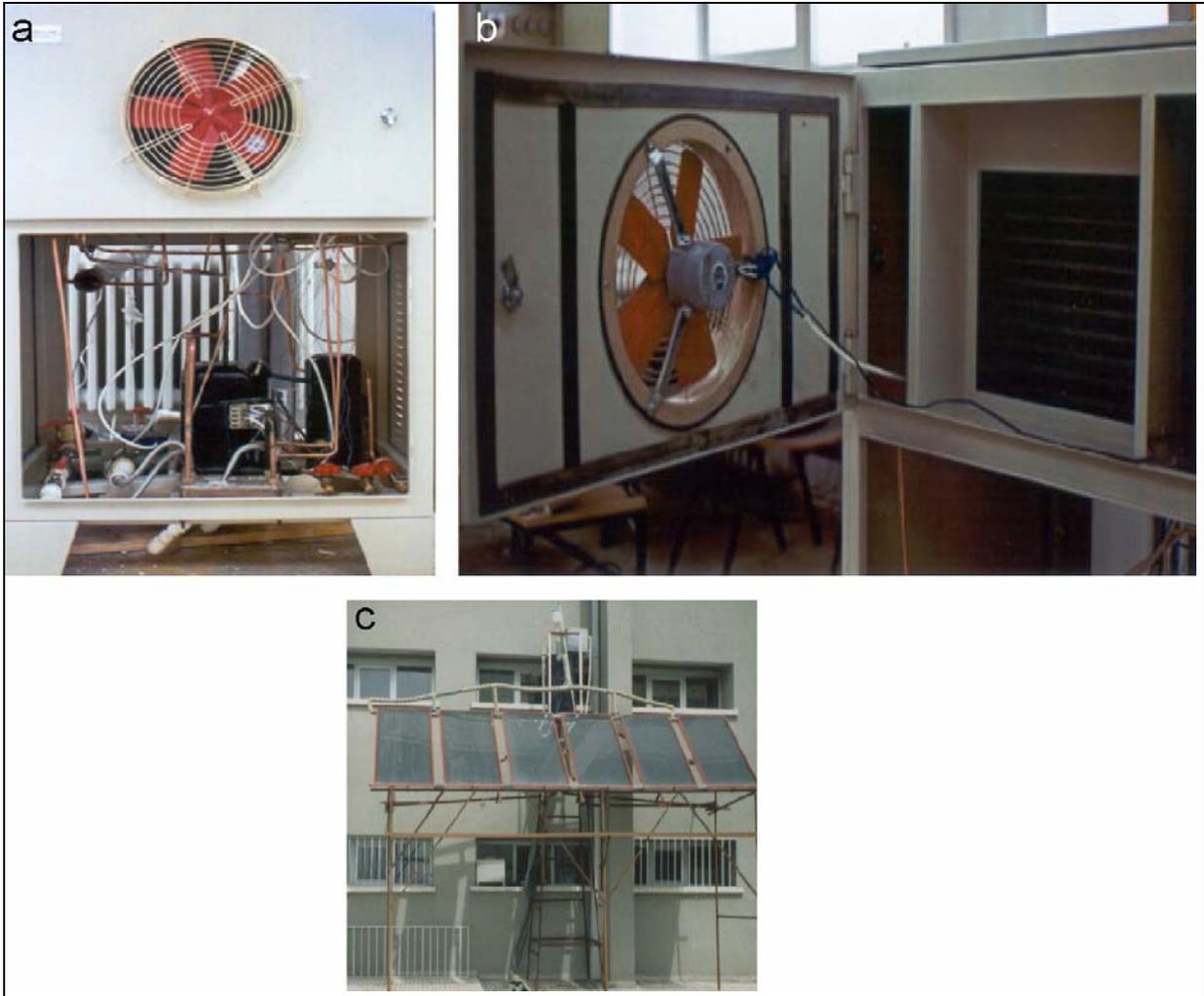


Figure III.6 : Photographie des composants construits de système.

Calcul thermodynamique de l'installation :

En général, le bilan d'enthalpie est l'expression du premier principe de la thermodynamique qui s'écrit sous la forme :

$$\dot{Q} + \sum \dot{m}_{ent} \cdot h_{ent} = \dot{W} + \sum \dot{m}_{sort} \cdot h_{sort}$$

Par ailleurs, le bilan exergétique global peut être écrit comme suit :

$$\dot{E}x_{pert} = \dot{E}x_{ent} - \dot{E}x_{sort}$$

En utilisant les expressions de l'exergie des courants de matière et thermique interagissant avec l'installation, on a :

$$\dot{E}x_{pert} = \dot{E}x_Q - \dot{E}x_W + \dot{E}x_{m,ent} - \dot{E}x_{m,sort}$$

Sous sa forme explicite, le bilan a pour expression :

$$\dot{E}x_{pert} = \sum (1 - \frac{T_0}{T_i}) \cdot \dot{Q}_i - \dot{W} + \sum \dot{m}_{ent} \cdot e_{ent} - \sum \dot{m}_{sort} \cdot e_{sort}$$

Où e_{ent}, e_{sort} représentent les flux d'exergie spécifique des courants de matière entrant et sortant du volume de contrôle.

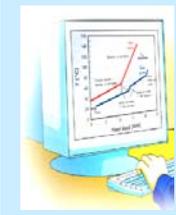
Tableau III.2: Equations des bilans de masse, d'énergie et d'exergie [39].

Composant	Bilan de masse	Bilan enthalpique	Bilan exergetique
Compresseur	$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_r$	$\dot{W}_{comp} = \dot{m}_r (h_2 - h_1)$	$\dot{I} = \dot{m}_r [(h_1 - h_2) - T_0 (s_1 - s_2)] + \dot{W}$
Condenseur	$\dot{m}_2 = \dot{m}_3 = \dot{m}_r$	$\dot{Q}_{cond} = \dot{m}_r (h_2 - h_3)$	$\dot{I} = \dot{m}_r [(h_1 - h_2) - T_0 (s_1 - s_2)] - \dot{Q}_{vent} \left(1 - \frac{T_0}{T_{ent,air}} \right)$
Tube capillaire	$\dot{m}_3 = \dot{m}_4 = \dot{m}_r$	$h_3 = h_4$	$\dot{I} = \dot{m}_r [(h_3 - h_4) - T_0 (s_3 - s_4)]$
Evaporateur	$\dot{m}_{14} = \dot{m}_{13} = \dot{m}_e$	$\dot{Q}_{evap} = \dot{m}_r (h_7 - h_4)$	$\dot{I} = \dot{m}_r [(h_7 - h_4) - T_0 (s_7 - s_4)] + \dot{m}_E [(h_{14} - h_{13}) - T_0 (s_{14} - s_{13})]$
Capteur solaire	$\dot{m}_{15} = \dot{m}_{16}$	$\dot{Q}_{rad} = A_c \cdot G$	$\dot{I} = \dot{m}_{15} [(h_{15} - h_{16}) - T_0 (s_{15} - s_{16})] + \dot{Q}_{Rad} \left(1 - \frac{T_0}{T_p} \right)$
Echangeur de chaleur Solaire	$\dot{m}_{14} = \dot{m}_{13} = \dot{m}_e$	$\dot{Q}_u = \dot{m}_e \cdot C_{p_e} \cdot (T_{14} - T_{13})$	$\dot{I} = \dot{m}_e [(h_{13} - h_{14}) - T_0 (s_{13} - s_{14})] + \dot{Q}_u \left(1 - \frac{T_0}{T_e} \right)$

Le COP obtenu du système solaire assisté par une pompe à chaleur égale à 3,08, tandis que l'irréversibilité du capteur solaire est avérée à 1,92 kW et l'augmentation de COP est due à la diminution de l'irréversibilité dans l'évaporateur.

L'application du second principe (exergétique), est un outil très puissant pour optimiser les procédés. Les systèmes solaires comportent deux aspects : la forme de l'énergie utilisée et la température de l'air ambiant. L'étude du second principe appliquée à un système solaire nécessite l'évaluation des flux d'entropie et d'exergie liés au rayonnement solaire reçu à la surface de la terre, c'est à dire l'énergie radiative, parfaitement variable en intensité mais aussi en qualité avec ses deux composantes directe et diffuse.

Ces trois caractères doivent être intégrés dans l'analyse. Toutefois, les manuels de thermodynamique des procédés supposent que la température d'une source de chaleur est constante ; or, en réalité, la température ambiante (température du milieu environnant) est variable. Ce point est particulièrement sensible lors de l'application du principe de l'analyse exergétique car l'exergie est une fonction thermodynamique définie par rapport à un état de référence (milieu environnant) [40].



Chapitre IV

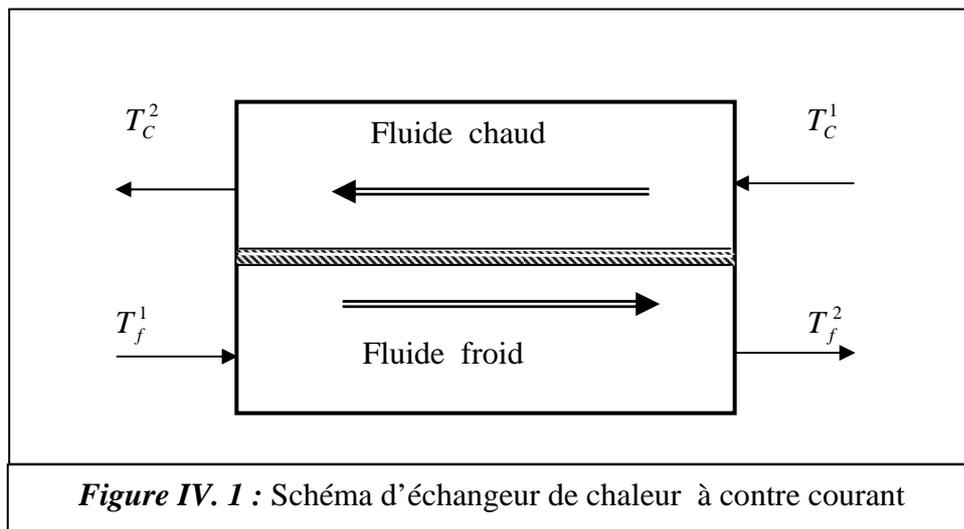
Modélisation et synthèse d'un réseau d'échangeurs de chaleur sur la base du concept de l'exergie

IV.1. Modélisation d'un échangeur de chaleur

L'analyse des performances des diverses technologies conduit de manière classique à calculer leurs bilans massiques et énergétiques, notamment lorsqu'on cherche à optimiser le fonctionnement d'un système. L'établissement de son bilan exergétique présente un grand intérêt dans la quantification des irréversibilités c'est-à-dire les dégradations de la qualité de l'énergie lors de son fonctionnement. Cette approche n'est autre que l'expression du second principe de la thermodynamique qui tient compte de la capacité du système à produire de l'exergie.

IV.1.1. Equations du modèle

L'étude du comportement thermique d'un échangeur de chaleur met en jeu une série d'équations : bilan d'enthalpie, bilan d'exergie et l'équation de la cinétique du transfert de chaleur, etc.



Pour alléger notre analyse, nous avons émis les hypothèses suivantes :

- La variation des énergies cinétique et potentielle est négligeable.
- La variation d'exergie cinétique, chimique et potentielle est négligeable.
- Les pertes thermiques sont négligeables.
- Le transfert de chaleur se fait sans changement de phase et en l'absence de toute réaction chimique.
- Pertes de charge négligeables dans les conduites.

Si la pression de fonctionnement P et la chaleur spécifique C_p sont constantes pour chaque courant, l'application de la première loi de la thermodynamique pour un échangeur de chaleur, sans pertes thermiques, conduit à l'établissement du bilan enthalpique suivant :

$$(\dot{m}_c C p_c)(T_c^2 - T_c^1) + (\dot{m}_f C p_f)(T_f^2 - T_f^1) = 0 \quad \dots\dots (IV.1)$$

L'application simultanée du premier et du deuxième principe de la thermodynamique pour un échangeur de chaleur donne l'équation du bilan d'énergie disponible (bilan exergetique) :

$$\left(\dot{m}_f C p_f\right)\left[\left(T_f^2 - T_f^1\right) - T_0 \log \frac{T_f^2}{T_f^1}\right] + \left(\dot{m}_c C p_c\right)\left[\left(T_c^2 - T_c^1\right) - T_0 \log \frac{T_c^2}{T_c^1}\right] + \left(T_0 \Delta \dot{S}\right) = 0 \quad \dots (IV.2)$$

La combinaison des équations (IV.1) et (IV.2) donne :

$$T_0 \Delta \dot{S} = T_0 \left[\left(\dot{m}_f C p_f\right) \log \frac{T_f^2}{T_f^1} + \left(\dot{m}_c C p_c\right) \log \frac{T_c^2}{T_c^1} \right] \dots\dots\dots (IV.3)$$

Pour un échangeur de chaleur à contre courant, l'équation de la cinétique de transfert de chaleur peut être établie par la formule suivante :

$$\dot{Q} = A U (\Delta T)_{ln} = \dot{m}_f p_f (T_f^2 - T_f^1) \quad \dots\dots\dots (IV.4)$$

Toutefois, il y a lieu de faire remarquer que la moyenne logarithmique $(\Delta T)_{ln}$ peut prendre des valeurs extrêmes en fonction de la valeur du rapport de débits calorifiques des deux courants (R). Ainsi, on a :

$$\left\{ \begin{array}{l} R \neq 1 \Rightarrow (\Delta T)_{ln} = \frac{(T_c^1 - T_f^2) - (T_c^2 - T_f^1)}{\log \frac{(T_c^1 - T_f^2)}{(T_c^2 - T_f^1)}} \\ R = 1 \Rightarrow (\Delta T)_{ln} = T_c^2 - T_f^1 \end{array} \right. \quad \dots\dots (IV.5)$$

La condition de faisabilité de l'échange de chaleur est exprimée par les équations des contraintes suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} g_1 = T_c^1 - T_f^2 \geq 0 \\ g_2 = T_c^2 - T_f^1 \geq 0 \end{array} \right. \quad \dots\dots\dots (IV.6)$$

Pour l'analyse de la rentabilité de l'échange et de sa faisabilité sur le plan thermodynamique, on a opté pour deux critères distincts :

- Critère économique.
- Critère thermodynamique.

Pour réduire la consommation de l'énergie, on note qu'il est impératif de minimiser la dissipation de l'énergie (ou minimiser la fonction d'irréversibilité) qui est introduite par la fonction irréversibilité, définie par :

$$f_1 = \left(T_0 \Delta \dot{S} \right) = T_0 \left[(\dot{m}_f C_{p_f}) \log \frac{T_f^2}{T_f^1} + (\dot{m}_c C_{p_c}) \log \frac{T_c^2}{T_c^1} \right] \iff \text{Min} \dots \text{(IV.7)}$$

De point de vue économique, la minimisation de la surface d'échange doit prendre en considération deux cas extrêmes, en fonction de la valeur de R. Ainsi, on a :

$$R = 1 \quad f_2 = A = \frac{(\dot{m}_f C_{p_f})(T_f^2 - T_f^1)}{U (T_c^2 - T_f^1)} \iff \text{Min} \dots \text{(IV.8)}$$

$$R \neq 1 \quad f_2 = A = \frac{(\dot{m}_f C_{p_f})(T_f^2 - T_f^1)}{U \frac{(T_c^1 - T_f^2) - (T_c^2 - T_f^1)}{\log \frac{(T_c^1 - T_f^2)}{(T_c^2 - T_f^1)}}} \iff \text{Min} \dots \text{(IV.9)}$$

Cette analyse assez simpliste par son formalisme conduit à l'optimisation du fonctionnement d'un échangeur de chaleur. Toutefois, cette étude basée sur le concept de l'exergie est très riche en enseignements. Du point de vue faisabilité thermodynamique, le signe algébrique de (ΔS) permet le contrôle des conditions réelles de l'échange thermique en fonction des différents niveaux de températures aux extrémités de l'échangeur.

Application à la synthèse de réseau d'échangeurs de chaleur :

Soit un réseau d'échangeurs de chaleur composé de M courants chauds et N courants froids, La dissipation d'énergie totale dans le système peut être évaluée à partir des températures d'entrée et de sortie de tous les courants sans, pour autant, estimer la dissipation d'énergie pour chaque échangeur pris individuellement. La dissipation de l'énergie totale dans le réseau s'écrit [42] :

$$f_1 = \left(T_0 \Delta \dot{S} \right) = T_0 \left[\sum_{n=1}^N (\dot{m}_f)_n (Cp_f)_n \log \frac{(T_f^2)_n^{L_n}}{(T_f^1)_n^1} + \sum_{m=1}^M (\dot{m}_c)_m (Cp_c)_m \log \frac{(T_c^2)_m^{K_m}}{(T_c^1)_m^1} \right] \dots (IV.10)$$

Chaque échangeur de chaleur est numéroté dans l'ordre de l'entrée à la sortie le long d'un courant chaud ou d'un courant froid. On note que, K_m est le dernier échangeur le long d'un courant chaud m alors que L_n est le dernier échangeur le long d'un courant froid n . D'autre part, la surface d'échange totale est la somme de toutes les surfaces des échangeurs de chaleur, siège d'échange dans le réseau lequel est obtenu par l'utilisation du diagramme du contenu enthalpique. Son expression est [42]:

$$f_2 = \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^{K_m} A_m^k \dots (IV.11)$$

Avec :

$$\left. \begin{aligned} A_m^k &= \frac{(\dot{m}_f)_m^k (Cp_f)_m^k}{U_m^k (R_m^k - 1)} \cdot \log \frac{(T_c^1)_m^k - (T_f^2)_m^k}{(T_c^2)_m^k - (T_f^1)_m^k}, & R_m^k &\neq 1 \\ \text{ou :} & & & \\ A_m^k &= \frac{(\dot{m}_f)_m^k (Cp_f)_m^k}{U_m^k} \cdot \frac{(T_f^2)_m^k - (T_f^1)_m^k}{(T_c^2)_m^k - (T_f^1)_m^k}, & R_m^k &= 1 \end{aligned} \right\} \dots (IV.12)$$

IV.2 Concept du degré de liberté appliqué à un échangeur de chaleur

Pour déterminer toutes les variables de conception lesquelles sont contrôlables extérieurement, on a procédé par une analyse de degrés de liberté de tout élément (échangeur de chaleur) présent dans l'unité (réseau d'échangeurs de chaleur) laquelle est basée essentiellement sur la règle de phases de Gibbs [41] d'une part et sur les lois de conservation de la matière et de l'énergie d'autre part. Si on désigne par N_V le nombre de variables inconnues et N_E le nombre d'équations indépendantes, le nombre de degrés de liberté N_D (variance) est calculé par la relation suivante :

$$N_D = N_V - N_E \dots (IV.13)$$

Il est évident que cette méthode facilite considérablement le choix des variables de conception tout en améliorant les conditions de traitement mathématique lorsqu'on fait appel à l'outil informatique dans l'étape de simulation.

IV.2 .1. Application pour un échangeur de chaleur

On considère l'échangeur de chaleur comme élément, siège d'interaction de 4 courants dont chacun est monophasique (constitué d'une seule phase). Si C désigne le nombre de constituants du courant, alors on peut lui associer (C+3) variables qui peuvent être spécifiées comme suit [41] :

- Fractions molaires X C
- Le débit total 1
- La pression 1
- La température 1

Il est important de noter que, dans un échangeur de chaleur, la seule interaction possible est l'interaction thermique entre les deux courants. Si on note C₁ le nombre de constituants du fluide chaud et C₂ le nombre de constituants du fluide froid, le nombre de variables permettant la conception de l'unité est de :

$$N_v = 2 \times (C_1 + C_2) + 12 \quad \dots\dots\dots (IV.14)$$

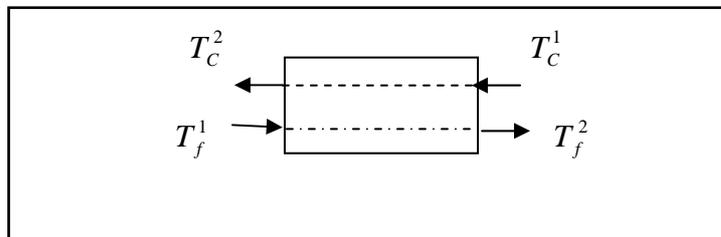


Figure IV. 2 : Les courants de matière dans un échangeur de chaleur à contre- courant.

Le nombre total d'équations restrictives peut être énuméré comme suit :

Bilan de matière par constituant :	(C ₁ - 1) + (C ₂ - 1)
Bilan de matière global :	1 + 1
Somme de compositions :	2 + 2
Bilan enthalpique :	1
	Total= (C ₁ + C ₂ + 5)

Donc, on a :

$$N_E = C_1 + C_2 + 5 \quad \dots\dots (IV.15)$$

Il en résulte, d'après l'équation (IV.13) que le nombre de degrés de liberté pour un échangeur de chaleur est de :

$$N_D = C_1 + C_2 + 7 \quad \dots\dots (IV.16)$$

En conséquence, il est important de spécifier la liste de ces variables de conception. On note que, dans notre étude, on a un échangeur de chaleur eau-eau donc le nombre de degrés de liberté :

$$C_1 = 1, \quad C_2 = 1$$

Il en découle que le nombre de degrés de liberté est de: $N_D = 9$

V.2.2. Spécification des variables

- Les deux débits : \dot{m}_f, \dot{m}_c .
- Températures d'entrée et de sortie du courant chaud T_c^1, T_c^2 .
- Températures d'entrée et de sortie du courant froid T_f^1, T_f^2 .
- Pression du courant chaud P_c .
- Pression du courant froid P_f .
- Puissance thermique échangée entre les deux courants (courants chaud et froid).

IV.3. Synthèse d'un réseau d'échangeurs de chaleur sur la base du concept de l'exergie

La conception d'un réseau d'échangeurs de chaleur optimal dépend de la structure (ou la configuration du réseau), du nombre d'échangeurs de chaleur et de la quantité d'utilités chaudes (vapeur d'eau) ou froides (eau de refroidissement) nécessaire pour obtenir des courants de sortie aux températures requises. Ces transferts thermiques s'effectuent dans des réseaux d'échangeurs de chaleur plus ou moins complexes. Le problème d'optimisation technico-économique prend donc en compte les coûts d'installation liés aux surfaces de transfert et au nombre d'appareils, ainsi que les coûts d'exploitation qui dépendent principalement de l'énergie consommée et des frais d'entretien.

Donc, on a intérêt à avoir un réseau exergetiquement optimal, comportant un nombre peu élevé d'appareils qui permettent la récupération d'énergie maximale lors du croisement des courants chauds et des courants froids. Sur la base des concepts introduits dans les paragraphes précédents abordés dans ce chapitre, nous comptons mettre au point une méthode de calcul, pour concevoir un réseau d'échangeurs de chaleur optimal tout en exploitant le diagramme de contenu enthalpique.

IV.3.1. Formulation du problème d'optimisation

Le problème d'optimisation d'un réseau d'échangeurs de chaleur peut être résolu par l'analyse mathématique de deux critères de performance (thermodynamique et économique) lesquels peuvent être définis par les deux fonctions objectifs :

1. La fonction objectif f_1 qui est l'expression de la fonction de la dissipation de l'énergie (ou l'irréversibilité) ;
2. La fonction objectif f_2 qui représente la surface totale d'échange de chaleur.

Le problème de minimisation des deux fonctions objectifs (f_1, f_2) se ramène à l'analyse de deux cas particulièrement connexes lesquels peuvent être spécifiés comme suit :

- Choix optimal de la source d'énergie sachant que la température d'entrée et le débit calorifique du courant chaud T_c^1 et $(\dot{m}_c Cp_c)$ non spécifiés.
- Détermination du réseau d'échangeurs de chaleur optimal sachant que la température d'entrée et le débit calorifique du courant chaud T_c^1 et $(\dot{m}_c Cp_c)$ sont spécifiés.

IV.4. Choix optimal de la source d'énergie

Dans ce cas, le problème consiste à déterminer des variables T_c^1 et $(\dot{m}_c Cp_c)$ pour minimiser les deux fonctions objectifs f_1 et f_2 , lorsque les variables $T_f^1, T_f^2, (\dot{m}_f Cp_f), U$ et T_0 sont spécifiées. En d'autres termes et sous forme analytique, il s'exprime par:

$$\begin{aligned} & \text{Min } (f_1, f_2) \\ & (T_c^1, \dot{m}_c Cp_c) \\ & \text{avec : } T_f^1, T_f^2, (\dot{m}_f Cp_f), U \text{ et } T_0 \text{ sont spécifiés} \end{aligned}$$

D'abord, l'optimisation du réseau passe impérativement par l'analyse du fonctionnement d'un échangeur isolé pour être étendue à un réseau d'échangeurs de chaleur complet. On suppose que les deux courants (froid et chaud) ne subissent pas de changement de phases et qu'ils ne sont pas siège de réactions chimiques.

IV.4.1. Optimisation thermodynamique

Pour établir la loi de conservation de l'énergie, il faut minimiser la dissipation de l'énergie (ou l'irréversibilité) soit la fonction f_I en utilisant la méthode de Newton pour la détermination des racines d'un système d'équations algébriques non linéaires

$$H_1[T_c^1, (\dot{m}_c . Cp_c)] = \frac{\partial f_1}{\partial (T_c^1)} = \frac{T_0 (\dot{m}_f . Cp_f) (T_f^2 - T_f^1)}{(T_c^1)(T_c^2)} = 0$$

$$H_2[T_c^1, (\dot{m}_c . Cp_c)] = \frac{\partial f_1}{\partial (\dot{m}_c . Cp_c)} = T_0 \left[\log \frac{T_c^2}{T_c^1} + \frac{R(T_f^2 - T_f^1)}{T_c^2} \right] = 0$$

Avec les contraintes liées aux conditions extrêmes du fonctionnement propre d'un échangeur de chaleur, soient :

$$\begin{cases} g_1 = T_f^2 - T_c^1 \leq 0 \\ g_2 = T_f^1 - T_c^2 \leq 0 \end{cases}$$

On note que la condition $\left(\frac{\partial f_1}{\partial T_c^1} \geq 0 \right)$ conduit à l'évaluation du vecteur gradient suivant la

ligne $g_1 = 0$.

Algorithme de la méthode de Newton :

1. Introduire les données :

Les variables spécifier : $T_f^1, T_f^2, (\dot{m}_f . Cp_f), U, T_0, \text{Epsilon } (\varepsilon)$.

Initialisation les valeurs de : T_c^1 et $(\dot{m}_c . Cp_c)$.

2. Calcul de la puissance échangée (quantité de chaleur reçu par le fluide froid).

$$Qt = (\dot{m}_f . Cp_f) (T_f^2 - T_f^1)$$

3. Calcul de la température de sortie du courant chaud T_c^2 à partir du bilan thermique.

$$Qt = (\dot{m}_f . Cp_f) (T_f^2 - T_f^1) = (\dot{m}_c . Cp_c) (T_c^1 - T_c^2)$$

4. Calcul du $(\Delta T)_{\ln}$.

$$(\Delta T)_{\ln} = \frac{(T_c^1 - T_f^2) - (T_c^2 - T_f^1)}{\log \frac{(T_c^1 - T_f^2)}{(T_c^2 - T_f^1)}}$$

5. Calcul de : H_1, H_2

$$H_1[T_c^1, (\dot{m}_c Cp_c)] = \frac{\partial f_1}{\partial (T_c^1)} = \frac{T_0 (\dot{m}_f Cp_f) (T_f^2 - T_f^1)}{(T_c^1)(T_c^2)} = 0$$

$$H_2[T_c^1, (\dot{m}_c Cp_c)] = \frac{\partial f_1}{\partial (\dot{m}_c Cp_c)} = T_0 \left[\log \frac{T_c^2}{T_c^1} + \frac{R(T_f^2 - T_f^1)}{T_c^2} \right] = 0$$

6. Calcul des dérivées partielles des fonctions $H_1(T_c^1, (\dot{m}_c Cp_c)), H_2(T_c^1, (\dot{m}_c Cp_c))$ pour composer les éléments de la matrice jacobienne qui sont identifiés par les expressions suivantes :

$$J = \begin{vmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{vmatrix}$$

Avec $J_{11} = \frac{\partial H_1}{\partial T_c^1}$, $J_{12} = \frac{\partial H_1}{\partial (\dot{m}_c Cp_c)}$

$$J_{21} = \frac{\partial H_2}{\partial T_c^1}$$
 , $J_{22} = \frac{\partial H_2}{\partial (\dot{m}_c Cp_c)}$

$$J_{11} = \frac{\partial H_1}{\partial (T_c^1)} = \frac{-T_0 (\dot{m}_f Cp_f) (T_f^2 - T_f^1) (T_c^2 + T_c^1)}{(T_c^1 T_c^2)^2}$$

$$J_{12} = \frac{\partial H_1}{\partial (\dot{m}_c Cp_c)} = \frac{T_0 \left[(\dot{m}_f Cp_f) (T_f^2 - T_f^1) \right]^2 \times (T_c^2)^2}{T_c^1 (\dot{m}_c Cp_c)^2}$$

$$J_{21} = \frac{\partial H_2}{\partial (T_c^1)} = T_0 \left[\frac{1}{T_c^2} - \frac{1}{T_c^1} - \frac{R(T_f^2 - T_f^1)}{(T_c^2)^2} \right]$$

$$J_{22} = \frac{\partial H_2}{\partial (\dot{m}_c Cp_c)} = \frac{T_0}{(\dot{m}_c Cp_c)^2} \left[-(T_f^2 - T_f^1) (\dot{m}_f Cp_f) T_c^2 + R(T_f^2 - T_f^1)^2 (\dot{m}_f Cp_f) (T_c^2)^2 \right]$$

7. Inversion de la matrice Jacobienne J^{-1}

$$J = \begin{pmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{pmatrix}$$

$$Det(J) = (J_{11} \cdot J_{22}) - (J_{21} \cdot J_{12})$$

✚ Si : $Det(J) \neq 0$

$$J^{-1} = \frac{1}{Det(J)} \begin{pmatrix} J_{22} & -J_{12} \\ -J_{21} & J_{11} \end{pmatrix}$$

8. Calcul de $(T_c^1)^{k+1}$ et $(\dot{m}_c \cdot Cp_c)^{k+1}$:

$$(T_c^1)^{k+1} = (T_c^1)^K - \frac{1}{det(J)} \left[J_{22} H_1[(T_c^1)^K, (\dot{m}_c \cdot Cp_c)^k] - J_{12} H_2[(T_c^1)^K, (\dot{m}_c \cdot Cp_c)^k] \right]$$

$$(\dot{m}_c \cdot Cp_c)^{k+1} = (\dot{m}_c \cdot Cp_c)^K - \frac{1}{det(J)} \left[-J_{21} H_1[(T_c^1)^K, (\dot{m}_c \cdot Cp_c)^k] + J_{11} H_2[(T_c^1)^K, (\dot{m}_c \cdot Cp_c)^k] \right]$$

9. La vérification du critère de convergence :

$$Norm = \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{(T_c^1)^{k+1} - (T_c^1)^K}{(T_c^1)_1^{k+1}} \right)^2 + \left(\frac{(\dot{m}_c \cdot Cp_c)^{k+1} - (\dot{m}_c \cdot Cp_c)^K}{(\dot{m}_c \cdot Cp_c)^{k+1}} \right)^2}$$

- Si : $(Norm) > \varepsilon$ remplacer les valeurs de $(T_c^1)^k, (\dot{m}_c \cdot Cp_c)^k$ par les valeurs $(T_c^1)^{k+1}, (\dot{m}_c \cdot Cp_c)^{k+1}$ et reprendre les calculs à partir de l'étape 03.
- Sinon : $Norm < \varepsilon$

Les valeurs de T_c^1 et $(\dot{m}_c \cdot Cp_c)$ correspondent à l'extrémum de la fonction f_i .

10. Calcul de la surface d'échange :

$$Q_t = (\dot{m}_f \cdot Cp_f) \times (T_c^1 - T_c^2) = AU (\Delta T)_{ln}$$

▪ Organigramme de calcul

Les différentes étapes du calcul sont données à travers l'organigramme ci-dessous.

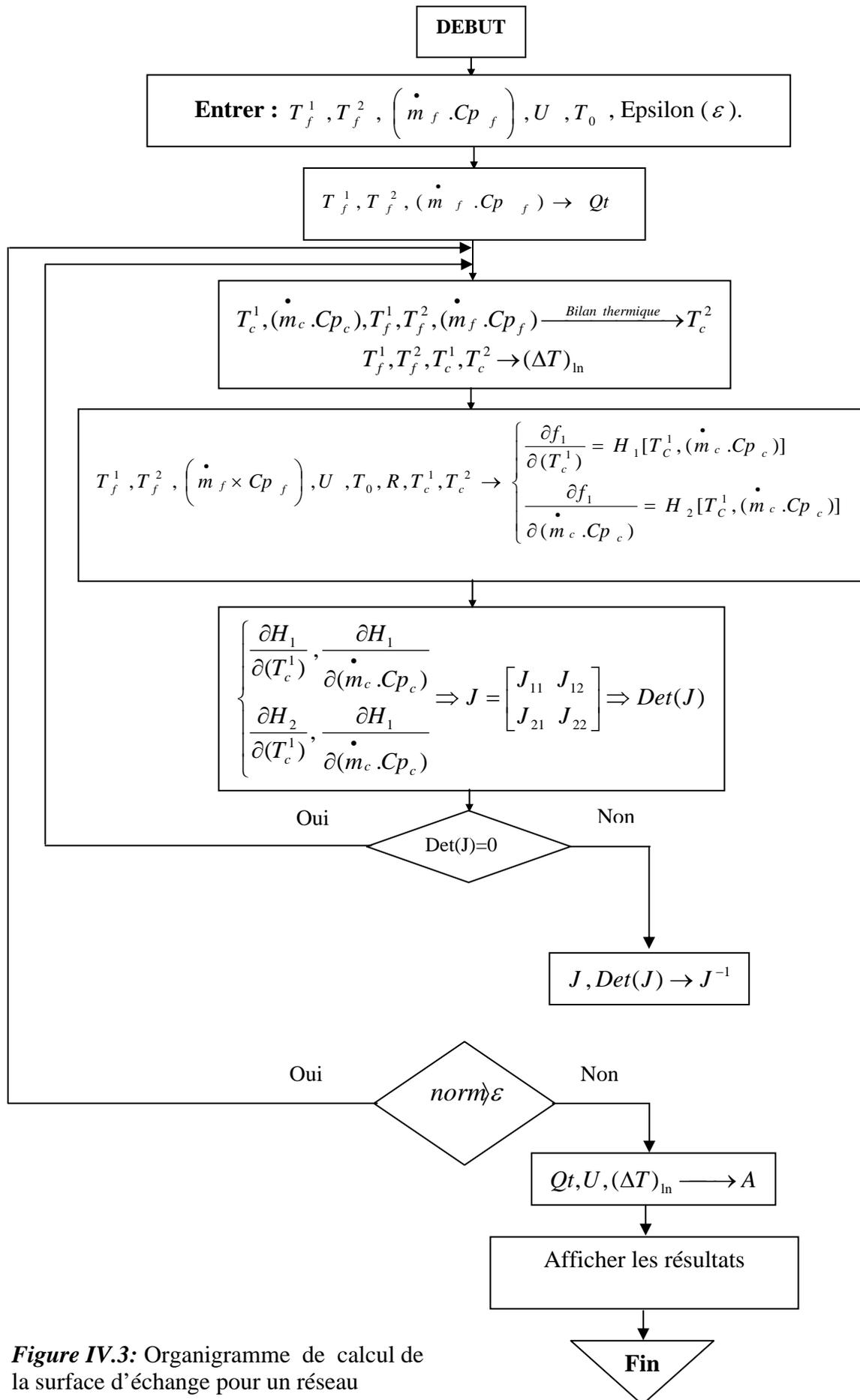


Figure IV.3: Organigramme de calcul de la surface d'échange pour un réseau

Pour minimiser la fonction objectif f_1 , les résultats de cette analyse montrent que la qualité énergétique du courant chaud (ou la source d'énergie) doit être du même ordre (qualité et quantité) que le courant froid ; C'est l'échangeur méthodique où la surface d'échange est infinie. Il en découle que les débits calorifiques soient égaux ce qui conduit aux deux égalités suivantes :

$$\begin{cases} (\dot{m}_c Cp_c) = (\dot{m}_f Cp_f) \\ T_c^1 = T_f^2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \text{Min} & f_1 \\ \text{Max} & f_2 \end{cases}$$

IV.4.2. Optimisation économique

Du point de vue économique, le coût d'un échangeur de chaleur dépend de la surface d'échange et des conditions opératoires de fonctionnement ainsi que de la nature du matériau dont il est constitué. Par conséquent et pour minimiser l'investissement, il y a lieu de minimiser la surface de l'échangeur de chaleur. Ce problème se traduit par une surface nulle ce qui correspond à une dissipation infinie de l'énergie où l'irréversibilité est infiniment grande, autrement dit le problème n'a pas de minimum local

IV. 5. Application au calcul du réseau d'échangeurs de chaleur optimal

Cette approche consiste à déterminer le réseau d'échangeurs de chaleur qui conduit à la minimisation des fonctions objectifs f_1 et f_2 . On supposera qu'on dispose de M courants chauds pour lesquels $(T_c^1)_i$ et $(\dot{m}_c Cp_c)_i$, $i = 1, 2, \dots, M$ et que les variables T_f^1, T_f^2 , $(\dot{m}_f Cp_f)$, U, T_0 des courants froids sont spécifiées. Si le coefficient global de transfert thermique est identique pour les différents échangeurs de chaleur du réseau, la structure optimale du réseau d'échangeurs de chaleur et l'interconnexion des courants est déduite du diagramme de contenu enthalpique pour des $(T_c^2)_i$ fixes. Toutefois, la minimisation de la surface d'échange totale peut être établie en changeant les $(T_c^2)_i$ dans le bilan enthalpique global [42] :

$$(T_f^2 - T_f^1)(\dot{m}_f Cp_f) + \sum_{i=1}^M [(T_c^2)_i - (T_c^1)_i](\dot{m}_c Cp_c)_i = 0$$

La valeur minimale de la fonction objectif f_2 (surface d'échange) est obtenue lorsque les températures $(T_c^2)_i$ satisfont les conditions d'égalité suivantes :

$$(T_c^2)_1 = (T_c^2)_2 = \dots = (T_c^2)_M$$

La variation de cette condition augmente la surface totale de transfert thermique. Cependant, l'irréversibilité f_1 (ou les pertes de l'énergie disponible) est maximale dans cette condition.

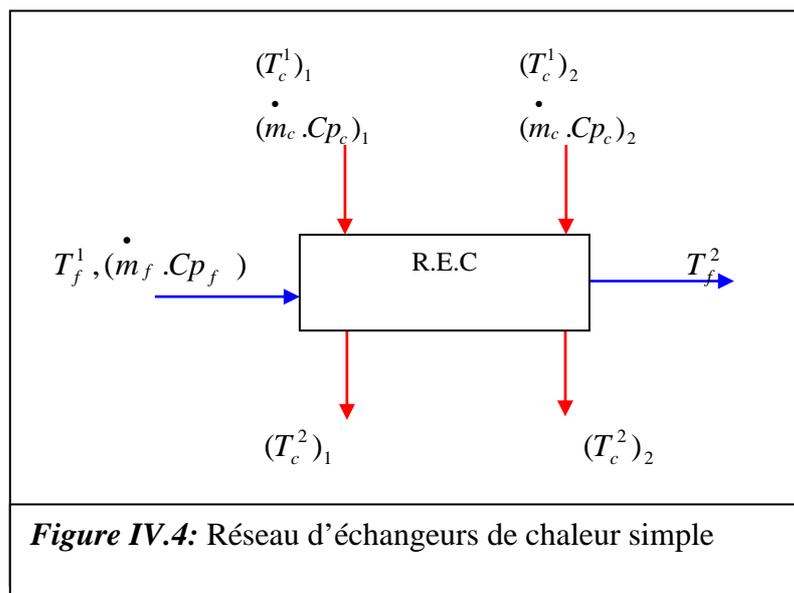
IV. 5. 1. Exemple d'application de l'analyse exergétique

Soit le problème qui consiste à chauffer un courant froid par l'utilisation de deux courants chauds pour lesquels les niveaux thermiques et les capacités calorifiques sont indiqués dans le tableau suivant :

Tableau IV.1: Données thermiques du problème.

Courant	Température d'entrée [K]	Température de sortie [K]	Débit calorifique [kW.K ⁻¹]
Chaud (1)	333,15	--	38,74
Chaud (2)	373,15	--	38,74
Froid	293,15	323,15	116,2

avec : $T_0 = 298,15 K$, $U = 232,4 W.m^{-2}.K^{-1}$. On peut schématiser grossièrement le couplage des courants de ce problème par un réseau d'échangeurs de chaleur simple tel que présenté dans la figure IV.4.



Si les températures de sortie des courants chauds $(T_c^2)_1, (T_c^2)_2$ sont spécifiées, la surface d'échange totale minimale est calculée par le diagramme de contenu enthalpique (Heat content diagramm (**H.C.D**) présenté dans la figure n° IV5.

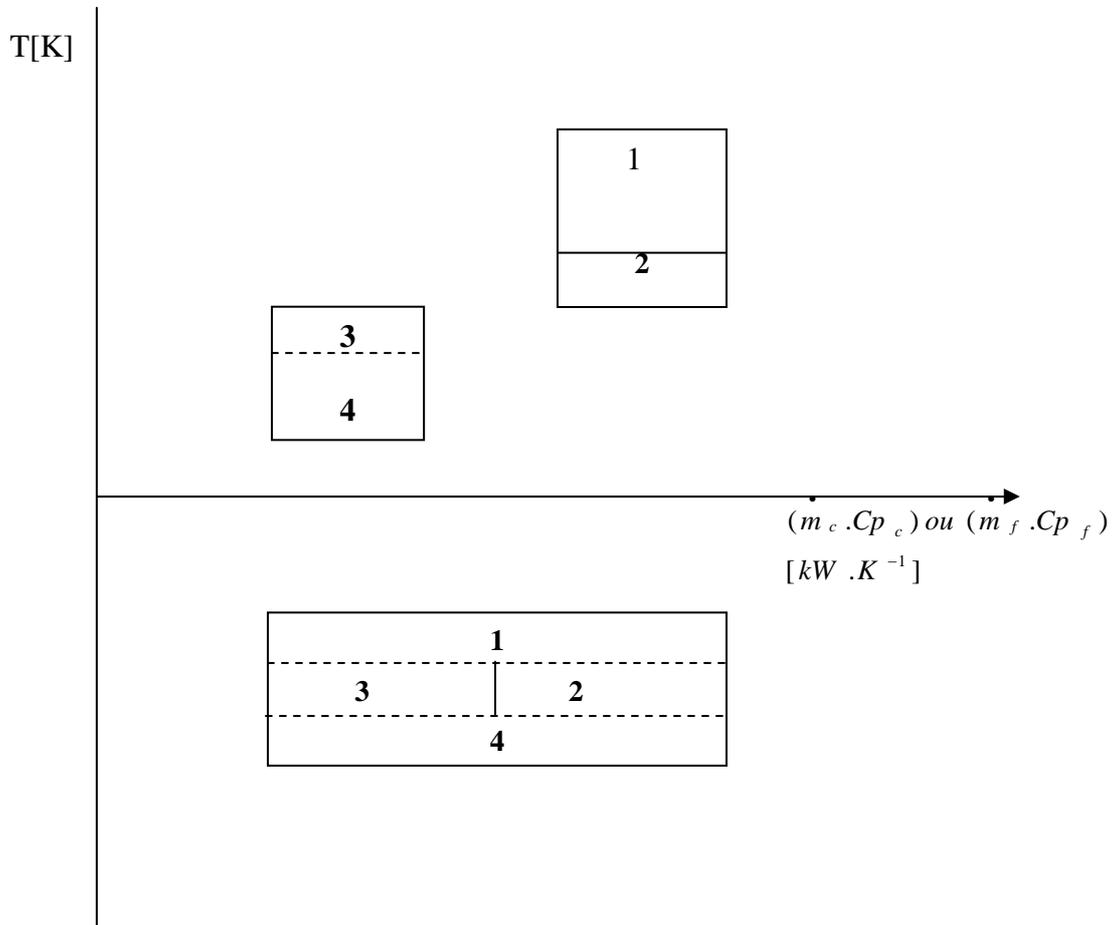
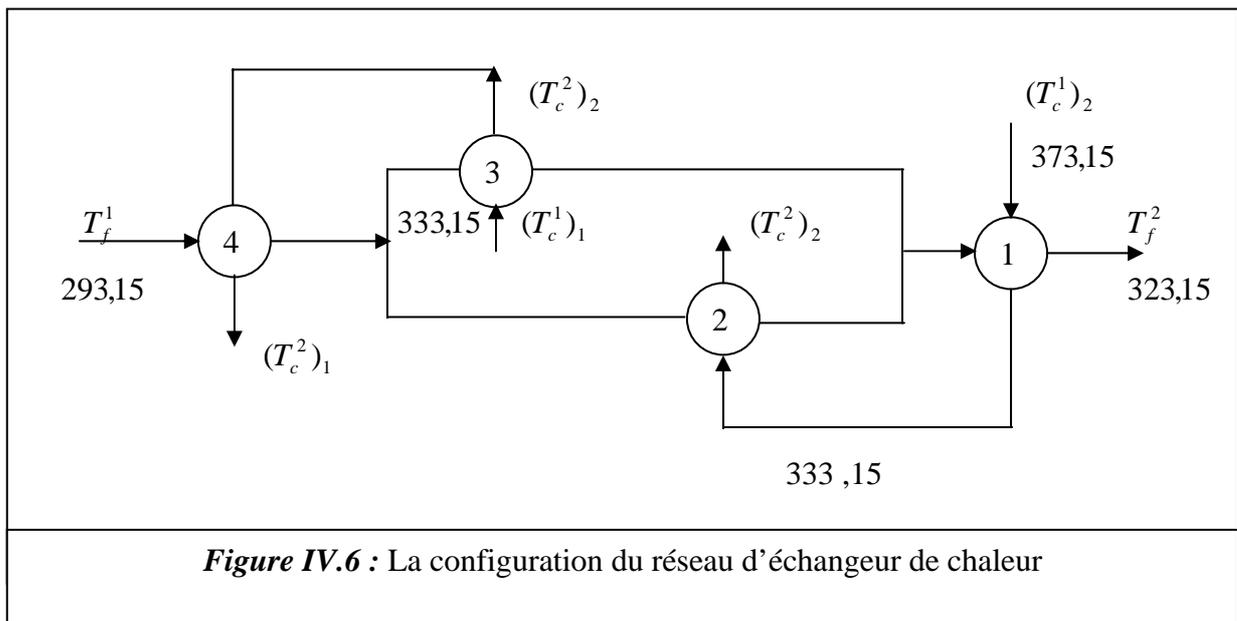


Figure IV.5 : Diagramme de contenu enthalpique

IV. 5.2. Diagramme de contenu enthalpique (H.C.D) :

Dans le diagramme de contenu de chaleur, l'axe vertical représente les températures d'entrée et de sortie des courants chauds et froids. L'origine de l'échelle est placée de telle sorte que tous courants chauds soient représentés au dessus de l'origine et que tous courants froids soient représentés en dessous. L'axe horizontal représente les débits calorifiques des différents courants (chauds et froids). Dans le diagramme, chaque courant (chaud ou froid) est représenté par un bloc dont la surface correspond à la quantité de chaleur qui lui est soustraite ou apportée pour atteindre la température recherchée. Les blocs chauds et froids désignés par les mêmes nombres ou lettre doivent avoir la même surface [07].



IV. 6. Comparaison des méthodes de conception de réseau

Afin de mettre en évidence l'intérêt de l'application du concept de l'exergie dans la conception du réseau optimal d'échangeurs de chaleur et compte tenu du développement théorique des différentes méthodes dans le chapitre n°I, nous avons jugé utile de présenter quelques exemples démonstratifs où on comparera les résultats obtenus par les deux méthodes en utilisant la surface d'échange comme critère. Toutefois, l'application de la méthode permettra le calcul des températures des courants froids qui minimiserait la dégradation de la qualité d'énergie (Exergie).

IV. 6. 1. Comparaison entre la MINLP et la méthode exergétique

Pour ce faire, nous avons recueilli des exemples de la littérature où la méthode MINLP a été appliquée avec succès sans donner pour autant les détails théoriques de son applications. C'est ainsi que nous avons essayé de confronter les deux méthodes par l'exploitation de l'exemple de Grossmann et Yee dont les données des courants chauds et des courants froids sont présentées dans le tableau n° IV.2 [15]. On note que S (sink: source) et W (well :puits) désignent source et puits respectivement pour lesquels l'échangeur, dans le réseau, aura besoin soit de l'apport énergétique dans le cas où il lui sera affecté S alors qu'il sera siège de consommation de l'énergie s'il lui sera affecté W.

Tableau IV.2 : Données du problème de Grossmann et Yee [15].

Nombre et type du courant	Température d'entrée [K]	Température de sortie [K]	Débit calorifique [kW.K ⁻¹]
(01) chaud	443	333	30
(02) chaud	423	303	15
(01) froid	293	408	20
(02) froid	353	413	40
s	450	450	//
w	293	313	//

IV. 6. 1. 1. Première configuration :

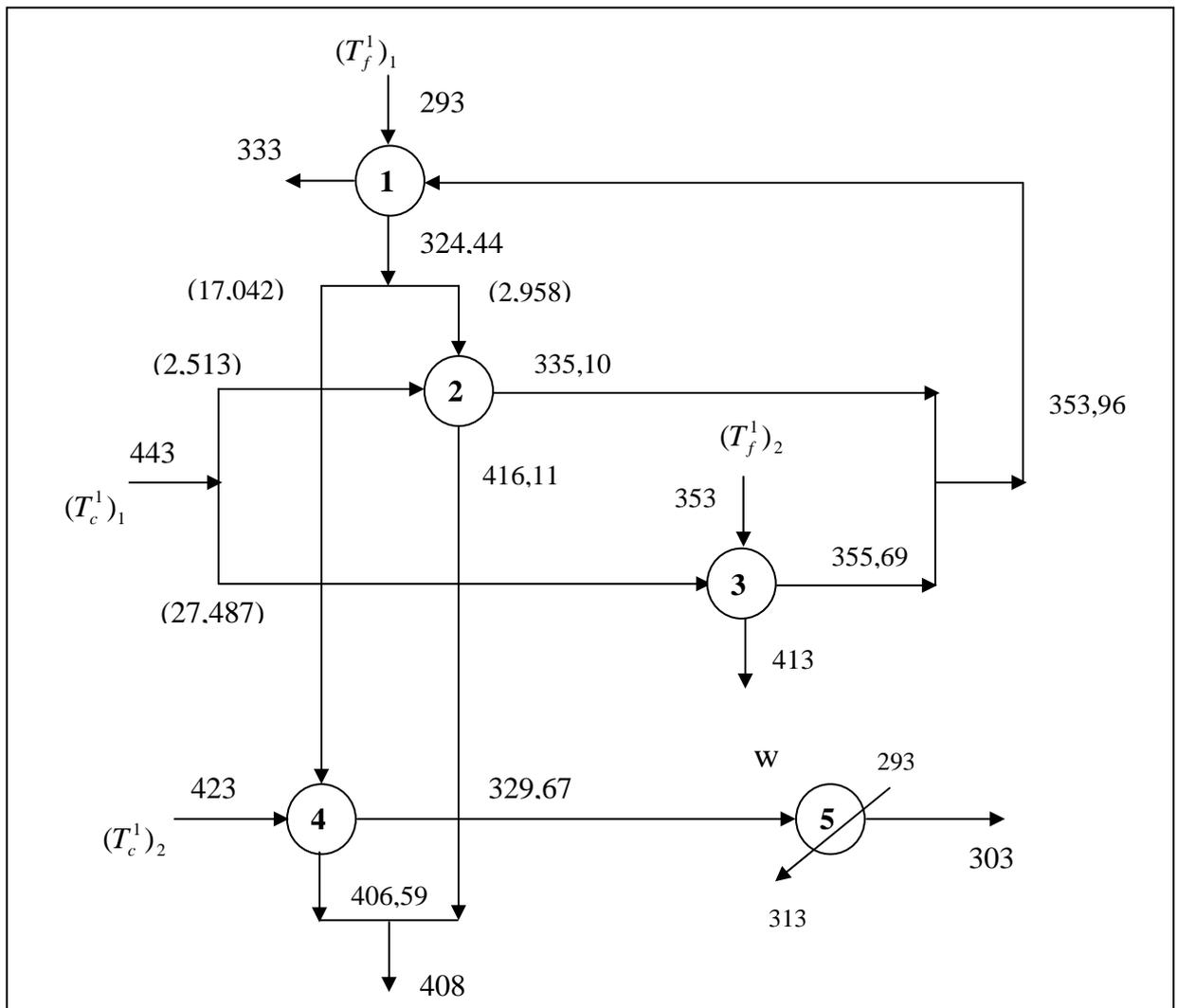


Figure IV.7 : Schéma d'une configuration du réseau

L'application de la méthode de MINLP (Programmation non-linéaire mixte) donne les résultats présentés dans le tableau suivant :

Tableau IV.3 : Les résultats de la méthode MINLP

Ordre de l'échangeur de chaleur	Flux de chaleur échangée [kW]	Surface d'échange [m ²]
1	628,8	22,8
2	271,2	19,3
3	2400	265,1
4	1400	179,0
5	400	38,3
Bilan	$\sum_{i=1}^{i=5} Q_j = 5100$	$\sum_{j=1}^{j=5} A_j = 524,5$

Par ailleurs, les résultats obtenus par l'application du concept développé dans la présente étude sont développés dans le tableau suivant :

Tableau IV.4 : Les résultats de la méthode exergetique.

Ordre de l'échangeur de chaleur	Flux de chaleur échangé [kW]	La surface d'échange [m ²]	Flux d'irréversibilité [kW]
1	628,8	15,19	61,82
2	271,2	12,88	10,32
3	2400	176,61	73,19
4	1400	119,32	31,97
5	400	25,53	16,46
Bilan	$\sum_{j=1}^{j=5} Q_j = 5100$	$\sum_{j=1}^{j=5} A_j = 349,53$	$\sum_{j=1}^{j=5} \dot{I}_j = 193,76$

Ayant appliqué les deux méthodes pour le réseau d'échangeurs de chaleur, on peut noter la supériorité de la méthode exploitant le concept de l'exergie sur la méthode MINLP car elle fournit un maximum d'informations sur les sites potentiels de production de l'irréversibilité et par conséquent situer le point où il est nécessaire d'intervenir pour la réduire à son strict

minimum. On doit noter qu'une répartition uniforme de la dégradation de l'énergie (principe de l'équipartition de l'irréversibilité) dans le réseau demeure la meilleure approche pour la conception optimale du réseau. Pour illustrer la différence entre les deux méthodes, nous avons regroupé les résultats de la comparaison dans le tableau IV.5. On remarque que le gain en investissement, généré par la méthode de calcul exergetique s'élève à 33%.

Tableau IV.5 : Comparaison entre les résultats des méthodes MINLP et exergetique.

La méthode	Flux de chaleur échangé [kW]	L'irréversibilité totale [kW]	La surface totale [m ²]
MINLP	$\sum_{i=1}^{i=5} Q_j = 5100$	//	$\sum_{j=1}^{j=5} A_j = 524,5$
Exergetique	$\sum_{j=1}^{j=5} Q_j = 5100$	$\sum_{j=1}^{j=5} I_j = 193,76$	$\sum_{j=1}^{j=5} A_j = 349,53$

IV. 6. 1. 2. Deuxième configuration :

Dans cette configuration du réseau, aucun courant ne se divise.

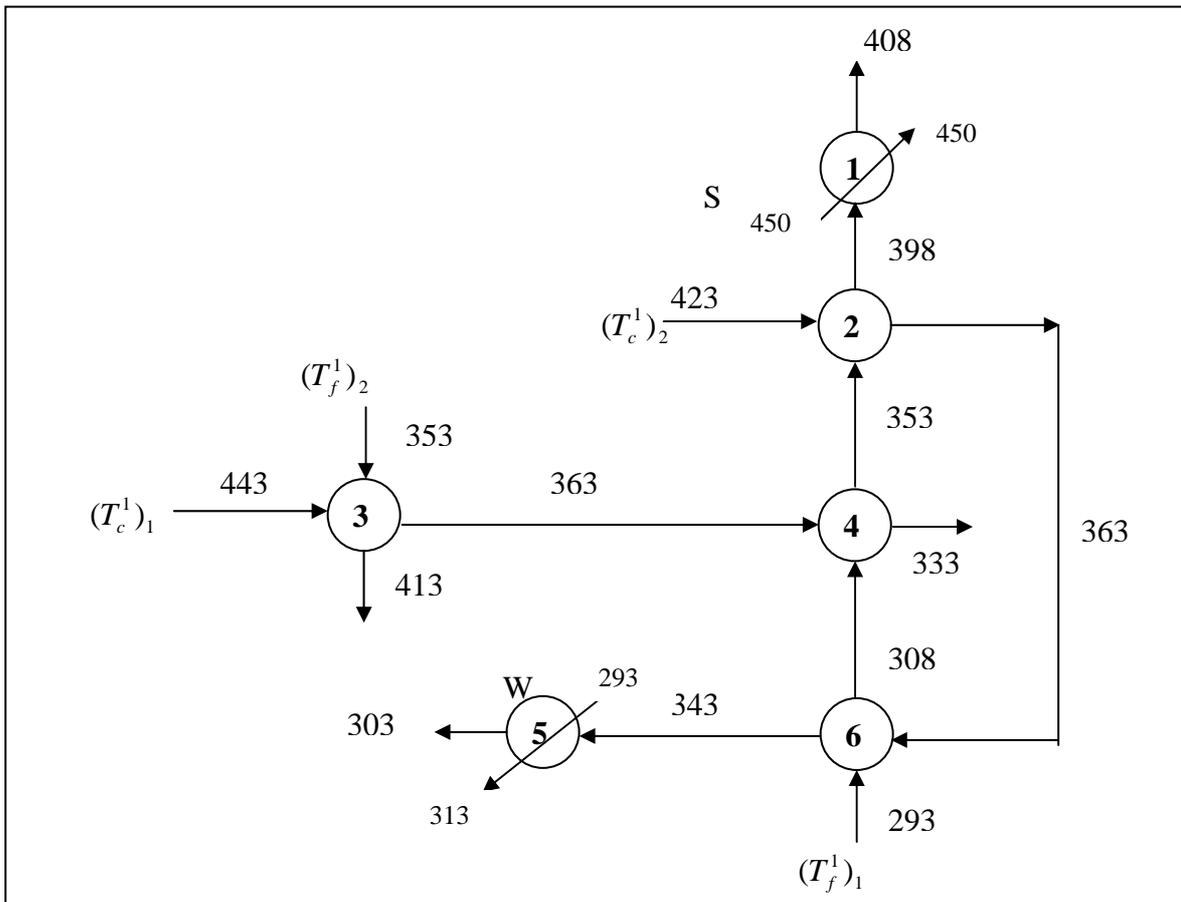


Figure IV.8 : Schéma d'une configuration du réseau en absence de division des courants.

L'application de la méthode de MINLP pour la deuxième configuration du réseau donne les résultats présentés dans le tableau suivant :

Tableau IV.6 : La méthode MINLP.

Ordre de l'échangeur de chaleur	Flux de chaleur échangée [kW]	Surface d'échange [m ²]
1	200	3,6
2	900	68,7
3	2400	164,8
4	900	68,7
5	600	41,2
6	300	7,1
Bilan	$\sum_{j=1}^{j=6} Q_j = 5300$	$\sum_{j=1}^{j=6} A_j = 354,1$

Autre part, l'application de l'analyse exergetique avec une configuration du réseau qui ne maintient pas un partage des courants ; donne les résultats présentés dans le tableau suivant :

Tableau IV.7 : La méthode exergetique.

Ordre de l'échangeur de chaleur	Flux de chaleur échangée [kW]	Surface d'échange [m ²]	Flux d'irréversibilité [kW]
1	200	3,56	147,97
2	900	45,81	31,34
3	2400	109,86	90,69
4	900	45,81	41,61
5	600	27,46	36,06
6	300	4,76	44,26
Bilan	$\sum_{j=1}^{j=6} Q_j = 5300$	$\sum_{j=1}^{j=6} A_j = 237,26$	$\sum_{j=1}^{j=6} I_j = 391,93$

Tableau IV.8 : Comparaison entre les résultats des méthodes MINLP et exergetique.

La méthode	Flux de chaleur échangée [kW]	L'irréversibilité totale [kW]	La surface d'échange totale [m ²]
MINLP	$\sum_{j=1}^{j=6} Q_j = 5300$	//	$\sum_{j=1}^{j=6} A_j = 354,1$
Exergetique	$\sum_{j=1}^{j=6} Q_j = 5300$	$\sum_{j=1}^{j=6} \dot{I}_j = 391,93$	$\sum_{j=1}^{j=6} A_j = 237,26$

D'après ces résultats, on remarque que la méthode exergetique conduit à un réseau dont la surface globale d'échange est nettement inférieure à celles calculées par la méthode MINLP (Programmation mixte entière non-linéaire) et l'écart s'avère à 32 %.

Ainsi que, la dissipation d'énergie disponible et la surface totale des échangeurs de chaleur sont en opposition. Donc il faut faire un compromis ou arrangement entre l'optimisation thermodynamique et l'optimisation économique.

Conclusion générale

Conclusion

Compte tenu de la cherté de l'énergie et de sa distribution non uniforme dans les différents procédés, nous avons entamé ce travail en vue d'apporter une solution qui serait adaptable aux différents cas de l'industrie. En effet, dans les sites industriels, l'amélioration de la rentabilité par la consommation judicieuse de l'énergie, d'eau et de matières premières doit impliquer la réduction des émissions de gaz à effet de serre et de quantités importantes des rejets thermiques. Par conséquent, la nécessité d'impliquer les réseaux d'échangeurs de chaleur (R.E.C) est la solution qu'il y a lieu d'explorer pour réduire la facture énergétique du secteur de l'industrie afin d'exploiter la chaleur localement disponible.

Dans cet objectif, nous sommes penchés sur le problème de l'analyse de la synthèse d'un réseau d'échangeurs de chaleur optimal en exploitant le concept de l'exergie. Ainsi, nous avons présenté les différentes méthodes de synthèse de REC qui ont fait l'objet de nombreuses recherches. Les travaux de Linnhoff et Hindmarsh, Shenoy, Floudas, Ciric et Grossmann, Furman et Sahinidis demeurent les fondements théoriques de la synthèse. Les méthodes numériques se sont suppléées pour résoudre le problème par l'exploitation de l'analyse des fonctions convexes (MINLP, etc.). Toutes ces méthodes semblent ne pas tenir compte de la qualité de l'énergie. Pour une analyse plus rigoureuse, nous avons présenté les types d'échangeurs de chaleur et les interactions thermiques et de matière des différents courants ainsi que leur influence sur son efficacité thermique.

Toutefois, les méthodes traditionnelles de synthèse d'un R.E.C ne prennent pas en considération la dégradation de la qualité d'énergie dans l'échangeur de chaleur en tenant compte de l'irréversibilité due au transfert de chaleur (gradient de température) ainsi que celle associée aux pertes de charge (effet visqueux). Pour ce faire, on a développé la notion d'exergie sous toutes ses formes lesquelles ont été appliquées au fonctionnement d'un échangeur de chaleur comme unité fondamentale de la structure du réseau. Nous avons mis l'accent sur l'influence particulière du niveau thermique de la source d'énergie ainsi que les pertes de charges inhérentes à l'écoulement des fluides dans les canalisations constitutives de l'échangeur.

Sur la base du concept de l'exergie développé ci-dessus, nous avons élaboré un algorithme pour la conception optimale d'un REC. En effet, nous avons introduit deux fonctions objectifs qui sont à minimiser simultanément :

- Flux de création d'entropie.
- Surface globale d'échange dans le réseau.

Compte tenu de l'interaction des différentes variables, on a eu recours à la méthode de calcul de degrés de liberté de l'échangeur afin d'énumérer le nombre des variables de conception lesquelles sont contrôlables extérieurement. On note que l'analyse exergetique, comme l'analyse entropique, conduit à une connaissance chiffrée des irréversibilités qui ont lieu dans tout échangeur de chaleur faisant partie du réseau. On remarque que la minimisation des deux fonctions objectifs définies ci-dessus conduit à une situation conflictuelle où il est nécessaire de faire un compromis entre l'optimisation économique et l'optimisation thermodynamique. Il en découle que le problème a été posé en termes de :

- Recherche de la source d'énergie sachant la disponibilité du réseau optimal.
- Détermination du réseau optimal sachant la disponibilité de la source thermique.

Compte tenu de la nature du problème posé, nous l'avons abordé sous son second aspect. La structure du réseau optimal a été entreprise sur la base du diagramme du contenu enthalpique. L'interconnexion des courants chauds et froids a été déduite directement du diagramme. La minimisation de la fonction irréversibilité cumulée dans le réseau a permis de calculer la température des courants.

Cette approche nous a conduit à la détermination du réseau optimal. Afin d'analyser son intérêt et son importance, nous avons présenté quelques résultats de la littérature où nous avons comparé les surfaces obtenues aux surfaces déterminées par la minimisation de l'irréversibilité. En effet, on remarque que la méthode prévoit un gain en matière économique de l'ordre de 30% et qu'elle présente des avantages certains sur les autres méthodes.

En guise de perspectives, on doit signaler que les irréversibilités liées à la dissipation visqueuse par écoulement ne sauraient être réduites que par la limitation du phénomène d'encrassement de la conduite tout en maintenant une surface aussi propre que possible. Enfin, on pense que la méthode doit être généralisée à des échangeurs avec changement de phases car le schéma abordé dans ce travail est, à juste titre d'analyse et il ne saurait être généralisé à tous les échangeurs de chaleur rencontrés dans les industries pétrochimiques, pharmaceutiques etc.

Annexe 01

Les méthodes de MINLP :

Les problèmes d'optimisation sont classés en grandes catégories, linéaire, non linéaire, programmation linéaire entiers-réels, en fonction de leurs caractéristiques mathématiques. La formulation la plus complexe, rencontrée fréquemment en Génie des Procédés, relève des problèmes non linéaires entiers-réels (MINLP pour Mixed-Integer Non Linear Programming), dont les techniques de résolution sont les plus récentes et les plus lourdes, puisque ce type de problème combine toutes les difficultés des autres. La résolution d'un problème MINLP peut être envisagée selon deux approches, stochastique et déterministe.

Deux méthodes de programmation mathématique efficaces largement utilisées pour la résolution de problèmes MINLP : Branch and Bound et approximations externes/égalité relaxation sont présentées ci-après [47].

- **Méthode Approximations Externes/Egalité Relaxation (AE/ER) :**

La méthode initiale impliquant seulement les approximations externes ne prend pas en compte certains cas particuliers tels que la non convexité de la fonction objectif et des contraintes impliquant des variables continues, ainsi que la non linéarité des équations mettant en jeu les variables entières, sauf dans certains cas où l'on remplace ces variables entières y par des variables continues x et l'on ajoute une contrainte $y = x$; d'autre part, la gestion des contraintes égalité impliquant des termes non linéaires n'est pas prise en compte.

La méthode des approximations externes présente d'autres limites : en effet, elle n'est utilisable que si des égalités linéaires et des contraintes inégalités, linéaires ou non, sont manipulées. Or, dans la plupart des procédés, les équations décrivant les performances des unités sont généralement non linéaires.

Il est possible, dans certains cas, de les éliminer algébriquement ou numériquement, mais cela conduit à des manipulations difficiles et très lourdes. L'algorithme implémenté dans cette étude permet de traiter les contraintes non linéaires rencontrées pendant la formulation des problèmes.

Dans le cadre de conception de procédés, et malgré son efficacité, l'algorithme AE/ER développé initialement par Kocis et Grossmann (1987), ne permettait pas dans certains cas d'atteindre une solution optimale du problème. Des améliorations efficaces ont été apportées par la suite à la procédure. La version initiale de la procédure et ses améliorations sont présentées ci-après [24].

Démarche globale de la procédure AE/ER

L'algorithme consiste à résoudre alternativement une série de sous problèmes de type NLP et de problèmes de type MILP. Le premier correspond à l'analyse détaillée de configurations des systèmes particuliers, tandis que le second correspond à la solution des approximations linéaires de la superstructure qui, soit, produira une nouvelle structure à résoudre, soit, identifiera le critère d'arrêt de la procédure de recherche.

La méthode des approximations externes est appliquée au problème [P]. Tout d'abord, une combinaison des variables binaires y^i est choisie. Un problème NLP est résolu à partir de ces valeurs fixées :

$$\left. \begin{array}{l} z(y^i) = c^i \times y^i + \min_x f(x) \\ g(x) + B \times y^i \leq 0 \\ x \in X \end{array} \right\} [S(y^i)]$$

Le problème $[S(y^i)]$ ainsi posé admet une solution optimale paramétrée par les valeurs fixées y^i et donnée par $[z(y^i), x^i]$. La valeur de la fonction objectif $z(y^i)$ fournit une borne supérieure à la valeur optimale z de [P].

L'approximation externe qui intervient dans l'algorithme consiste à linéariser au point x^i les fonctions $f(x)$ et $g(x)$, on obtient :

$$\begin{array}{l} (a^i)^T \times x - b^i \leq f(x) \\ D^i \times x - d \leq g(x) \\ \forall x \in X \end{array}$$

Où : b^i , a^i , sont respectivement un scalaire et un vecteur issus de la linéarisation de la fonction objectif, et d^i et D^i un vecteur et une matrice provenant de la linéarisation des contraintes.

Cette étape permet donc d'effectuer une estimation de la fonction objectif, qui correspond à une borne inférieure.

A l'itération k , les approximations externes sur les fonctions f et g au point x^i , $i=1, \dots, k$, permettent l'écriture du problème maître MILP donnant la solution Z^k selon :

$$\begin{aligned}
z^k &= \min_{x, y, \mu} c \times y + \mu \\
&\left. \begin{aligned} (a^i)^T \times x - \mu &\leq b^i \\ D^i \times x + B \times y^i &\leq d^i \end{aligned} \right\} i = 1, \dots, k \\
&x \in X, y \in U, \mu \in R \\
z^1 &\leq \dots \leq z^{k-1} \leq z^k \leq z^{k+1} \leq \dots \leq z
\end{aligned}$$

Afin de limiter le nombre d'itérations et d'améliorer l'efficacité de la procédure de recherche, une procédure dite 'Integer cuts' est introduite et peut être définie comme un critère de convergence. Son principe est soit l'élimination d'une structure précédemment analysée, soit sa prise en compte comme une solution efficace du problème maître MILP. En d'autres termes, la condition d'infaisabilité de la combinaison de certaines variables binaires est exprimée sous la forme d'une nouvelle contrainte ajoutée au problème MILP.

Ainsi, toutes les solutions y^m , pour $m \leq k$, deviennent inacceptables et la propriété de monotonie (ou uniformité) de Z exprimée précédemment est maintenue, ce qui devient alors un critère d'arrêt de la procédure. En effet, si Z^* est la meilleure borne supérieure choisie comme étant le coût optimal (le plus faible), alors $Z^* = \min \{z(y_i) : i=1, \dots, k\}$.

Cela signifie qu'en obtenant $Z^k > Z^*$, il n'y a pas d'autre configuration dans la superstructure qui puisse donner un coût optimal plus faible, ce qui permet d'arrêter la recherche.

Le problème MILP prend alors la forme suivante :

$$\begin{aligned}
z^k &= \min_{x, y, \mu} c^T y + \mu \\
&\left. \begin{aligned} (a^i)^T x - \mu &\leq b^i \\ D^i x + B y^i &\leq d^i \end{aligned} \right\} i = 1, \dots, k \\
z^{k-1} &\leq c^T y + \mu \leq z^* \\
&x \in X, y \in U, \mu \in R
\end{aligned}$$

Cette méthode classique a révélé certaines limites pour l'analyse de la convexité des problèmes impliquant des termes non linéaires. Etant donné que la méthode initiale présentait déjà une bonne efficacité pour la résolution de problèmes MINLP, Kocis et Grossmann (1988) ont ajouté une stratégie d'analyse de la convexité, dite stratégie à deux phases, et

impliquant des tests (locaux et globaux) pour vérifier la convexité. Cette procédure peut être d'une grande utilité dans le domaine de conception des procédés [24].

- **Algorithme AE/ER adapté à la conception des procédés**

La structure de l'algorithme initial AE/ER est présentée dans la figure :

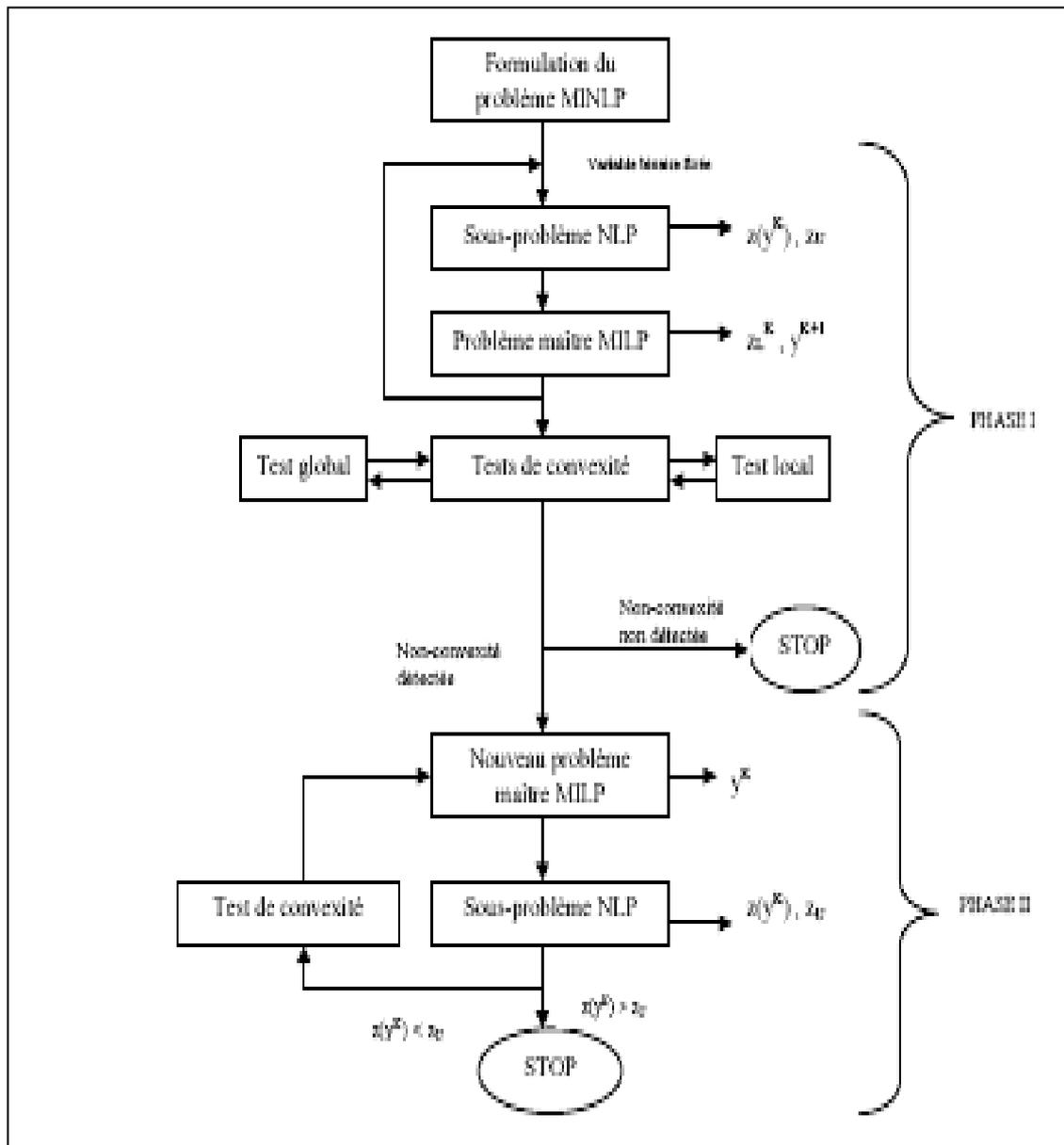


Figure A.01 : Organigramme de l'algorithme AE/ER

où :

Z_U = borne supérieure du sous-problème NLP.

Z_L = borne inférieure du problème maître MILP.

$Z(y^k)$ = solution du problème à l'itération k.

L'idée repose sur une stratégie en deux phases pour trouver la solution optimale d'un problème MINLP non-convexe. L'algorithme AE/ER est utilisé tel qu'il est décrit par la suite, mais selon des dispositions spéciales, dans la mesure où il est relié à des tests local et global qui identifient la non-convexité du problème. Si aucune non-convexité n'est détectée lors de cette première phase, alors la recherche est terminée et on résout 'normalement' le problème, sinon, on procède à une seconde phase où les linéarisations sont systématiquement modifiées dans un nouveau problème maître pour tenter d'obtenir des approximations externes valides.

La recherche est terminée quand aucune amélioration supplémentaire n'est trouvée dans le sous problème NLP.

L'algorithme AE/ER est utilisé au niveau de la phase 1. Cette étape est accompagnée d'une série de tests local et global. L'algorithme égalité relaxation est utilisé dans la phase 2.

▪ **Méthode Branch and Bound :**

Initialement développée par Gupta (1980) et Gupta et al. (1981), le principe général de la méthode d'énumération implicite est le suivant. Toutes les solutions possibles du problème peuvent être énumérées mais l'analyse des propriétés du problème permet d'éviter l'énumération de larges classes de mauvaises solutions. Dans un bon algorithme par séparation et évaluation successives, seules les solutions potentiellement intéressantes sont donc énumérées.

L'approche de type Branch-and-Bound communément appelée méthode de séparation et d'évaluation est une méthode générique de résolution de problèmes d'optimisation, et plus particulièrement d'optimisation combinatoire ou discrète. Dans ces méthodes, la séparation permet de pouvoir énumérer toutes les solutions, tandis que l'évaluation évite l'énumération systématique de toutes les solutions.

La phase de séparation consiste à diviser le problème en un certain nombre de sous problèmes qui ont chacun leur ensemble de solutions réalisables de telle sorte que tous ces ensembles recouvrent le problème initial. Dans le cas d'un problème MINLP, les variables discrètes sont considérées continues, d'où des sommets où chacun implique un problème de programmation non linéaire en variables continues (NLP). Par la suite des contraintes de bornes sont ajoutées sur certaines de ces variables de façon à obtenir des valeurs entières situées sur les bornes [22, 24].

En comparant les solutions des divers problèmes continus, on obtient une borne inférieure sur la valeur optimale du critère. On détermine également une borne supérieure sur cette valeur, qui correspond à une solution d'un problème NLP pour laquelle toutes les valeurs des variables discrètes du problème initial sont entières. L'exploration de toutes les branches conduisant à un critère (solution du problème NLP) plus grand que la borne supérieure peut être abandonnée (schéma du 'bounding'), ce qui permet de réduire la fraction explorée de l'arborescence. La valeur de la borne inférieure permet de définir la fonction d'évaluation de chaque sommet de l'arborescence, qui est utilisée pour définir la stratégie de déplacement dans l'arborescence (schéma de 'branching'). Par exemple, si l'on traite en premier lieu le sommet correspondant à la valeur minimale de la fonction d'évaluation, la méthode de Branch-and-Bound entre alors dans le cadre plus restreint des procédures par séparation et évaluation progressive, dont les propriétés de convergence ont été initialement établies par Gondran et al. (1979).

L'avantage de cette technique est la réduction de la fraction explorée de l'arborescence. Cependant, elle nécessite souvent un volume important de calculs, car l'exploration de chaque sommet correspond à la résolution d'un problème NLP de dimension d'autant plus grande que le nombre de variables discrètes est élevé.

B) - Méthodes Stochastique :

▪ Méthode du recuit simulé

Le recuit simulé est une procédure d'optimisation combinatoire multi-variables développée depuis plus d'une vingtaine d'années. C'est une méthode locale qui permet d'éviter de se bloquer dans des zones d'optimum local, en autorisant parfois un accroissement du critère, contrairement aux méthodes déterministes.

Rappelons que la méthode du recuit simulé reproduit l'évolution physique d'un solide tendant vers l'équilibre thermodynamique, par un lent refroidissement le conduisant à son état d'énergie minimal. L'analogie entre ce processus et une procédure d'optimisation est étudiée dans Kirkpatrick et al. (1982) et Metropolis et al. (1953). Un nouvel état (ou solution) est accepté si la fonction objectif diminue ou, dans le cas contraire, selon une probabilité dépendant de l'augmentation de la fonction et de la température courante.

La méthode se fonde sur une analogie entre les problèmes d'optimisation à caractère combinatoire et ceux de la physique statistique représentant le comportement d'une opération thermodynamique, le recuit physique des solides ; cette technique est utilisée en métallurgie lors de la solidification des métaux pour obtenir un état cristallin bien ordonné.

A partir d'un arrangement moléculaire initial (dans ce cas, agencement de modèles d'écoulement idéaux initial M , d'états énergétiques E_i donnés (respectivement possédant un critère $j(M)$), correspondant à une température T_i particulière, de nouveaux arrangements moléculaires possédant une énergie E_j (respectivement de nouvelles structures M' possédant un critère $j(M')$) sont générés successivement de manière stochastique. Si la nouvelle configuration a pour effet d'abaisser l'énergie, $E_j \leq E_i$, (respectivement de diminuer le critère, $j(M') \leq j(M)$) le changement s'opère (respectivement la nouvelle structure est acceptée) car l'état est plus stable. Si, au contraire, l'état énergétique est plus élevé, $E_j \geq E_i$, (respectivement le critère est dégradé, $j(M') \geq j(M)$) la transition peut être acceptée ou non selon une loi de probabilité [24, 47].

Les analogies entre la technique du Recuit Simulé en métallurgie et sa mise en oeuvre en tant que technique d'optimisation sont résumées sur le tableau I.2.

Recuit physique		Recuit Simulé
Paramètre de contrôle : la température		
T	↔	T_{RS}
Position des molécules	↔	Arrangement des structures (M)
Niveau énergétique (E)	↔	Critère d'optimisation (j(M))

Tableau A.1 : Analogies recuit physique / recuit simulé.

➤ Algorithme général de la méthode du recuit simulé

L'algorithme général d'un recuit simulé peut être schématisé de la manière suivante :

Choix d'une température initiale : T_{RS}°

Choix d'une structure initiale : $M = M^{\circ}$

Tant que critères d'arrêts non satisfaits, faire :

Répéter longueur de palier fois :

Génération d'une structure voisine de M : M'

Calcul de $\Delta j = j(M') - j(M)$

Si $\Delta j \leq 0$ alors $M = M'$

Sinon accepter M' avec une probabilité $p = f(\Delta j, T_{RS})$

Fin

Réduire température

Fin Tant que

Les différentes étapes de l'algorithme du recuit simulé pour la recherche de solutions sont les suivantes :

➤ choix d'une fonction objectif à minimiser ;

- adoption d'un schéma de recuit, dans lequel est précisés la température initiale, le nombre de configurations générées à chaque palier de température, et le schéma de décroissance de la température ;
- choix d'un critère d'acceptation de configurations dégradant le critère ;
- mécanismes du choix de la structure initiale et de génération stochastique de configurations « voisines ».
- choix des conditions d'arrêts.

▪ **Algorithmes génétiques**

Un algorithme génétique s'appuie sur une transposition artificielle des concepts de la génétique de Mendel et des lois de l'évolution énoncées par Darwin. Selon ces principes, lorsqu'une population est soumise à l'action du milieu naturel, seul les individus les mieux adaptés survivent et sont aptes à créer une descendance. Au cours des générations, cette sélection naturelle permet l'apparition d'individus de plus en plus adaptés au milieu naturel, assurant ainsi la continuité de l'espèce.

Les premiers algorithmes de ce type ont été développés dans les années 1950 par des biologistes qui cherchaient à simuler l'évolution d'organismes vivants, bien avant la découverte des chromosomes par les biologistes Watson et Crick. Plus tard, la structure de l'ADN et son implication dans l'évolution étant connues, des numériciens tels que Holland (1975), puis Goldberg (1994) ont adapté ces méthodes à la résolution de problèmes d'optimisation fortement combinatoires. Ils se sont fondés sur l'analogie qui peut exister entre un individu dans une population et la solution d'un problème parmi un ensemble de solutions possibles.

Les algorithmes génétiques sont directement inspirés du concept de sélection naturelle élaboré par Charles Darwin en 1859. Le vocabulaire employé, calqué sur celui de la génétique, comporte des termes tels que : individus (solutions potentielles), population, gènes (variables), chromosomes, parents, enfants, sélection, survie, croisement, mutation. S'il n'existe pas de preuve générale de l'efficacité des algorithmes génétiques, il est par contre aisé de constater l'efficacité de la sélection naturelle dans le monde vivant. En effet, il est clair que l'évolution a permis l'émergence d'organismes étonnamment adaptés à leur environnement.

▪ **Principe d'Algorithmes génétiques :**

Par analogie avec l'évolution naturelle, dans un algorithme génétique, un individu représente une solution possible d'un problème d'optimisation. Il est caractérisé par un ensemble de paramètres, codé dans son génotype. Ces paramètres permettent d'évaluer une fonction objectif traduisant la « force » de l'individu. Un échantillon d'individus constitue la population d'une génération donnée. Cette population subit une phase de sélection des individus les mieux adaptés au problème, soit « les plus forts », simulant ainsi l'influence du milieu naturel sur la survie des individus, qui auront la plus grande probabilité de se reproduire. Lors des phases de reproduction et de mutation, des opérateurs de croisement et des mutations adéquats agissent sur la structure de données des individus sélectionnés dans une population pour les transformer, afin de créer la génération suivante. Le but de cette étape est de permettre d'une part d'explorer de nouvelles zones de l'espace des solutions et d'autre part de diminuer le risque de figer la recherche sur un minimum local. En effet, en ce qui concerne ce dernier point, et contrairement aux procédures de programmation mathématique classiques, des dégradations de la fonction objectif sont tolérées lors de la mise en oeuvre d'un algorithme génétique, permettant ainsi de s'extraire des pièges constituées par des optima locaux. [24, 22]

Les analogies entre la génétique et les algorithmes génétiques sont résumées dans le tableau suivant :

Génétique	Algorithmes génétiques
Individu (représenté par ses chromosomes)	↔ Codage des solutions
Gènes	↔ Blocs élémentaires constitutifs du codage
Population	↔ Ensemble de structures solutions potentielles
Adaptation de l'individu à son milieu	↔ Critère à optimiser
Génération	↔ Itérations de la procédure

Tableau A.2 : Analogie génétique biologique/algorithme génétiques

➤ **Algorithme général d'un algorithme génétique :**

L'algorithme a la structure classique suivante :

Génération de la population initiale

Calcul de l'adaptation de la population initiale

Tant que numéro population inférieur à nombre maximum de générations, faire :

	Génération de la nouvelle population	
		Choix des individus survivants
		Génération des descendants par croisement
		Mutation des individus
	Fin	

Fin Tant que

Les divers éléments retenus et nécessaires à la mise en oeuvre de l'algorithme génétique sont :

- un codage des individus.
- une procédure de génération de la population initiale.
- une fonction d'adaptation qui permet d'évaluer l'adéquation d'un individu.
- des mécanismes de sélection, de croisement et de mutation.



Bibliographie



- [01]: **Frederic Staine**. Intégration énergétique des procédés industriels par la méthode du pincement étendue aux facteurs exergetique. École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL). Thèse de doctorat N°1318, 1994.
- [02]: **L. Rahal et M. Bezzina**. Contribution à l'Elaboration d'une Approche Rationnelle de Procédés de Transfert de Chaleur au Sein d'un Réseau d'Echangeurs de Chaleur. *Revue Energie Renouvelable*, pp 189-192, 2001.
- [03]: **B. Linnhoff et E. Hindmarsh**. The pinch design method for heat exchanger networks. *Chemical Engineering Science*. Vol.38, N°5, pp 745-763, 1983.
- [04]: **W. Verhayen, N. Zhang**. Design of flexible heat exchanger network for multi-period operation. *Chemical Engineering Science* 61, pp 7730-7753, 2006.
- [05]: **K. Telang, F.C. Knopf et R.W. Pike**. The Heat Exchanger Network, User's Manual. Mineral Processing Research Institute, Copyright, 2001.
- [06]: **Centre de la technologie de l'énergie de CANEMET (CTEC)**. L'analyse Pinch pour l'utilisation efficace de l'énergie, de l'eau et de l'hydrogène. Catalogue N° M39-96. Varennes (Québec) Canada, 2003.
- [07]: **K. Belkebir Mekki et C. Simoussa**. Synthèse optimale des réseaux d'échangeurs de chaleur par ordinateur. Projet de fin d'étude; ENP d'Alger, Département de Génie Chimique. Juin 1985.
- [08]: **S. Colin et Chip. Howat**. Introduction to Heat Exchanger Networking. *Ph.D* Department of Chemical and Petroleum Engineering .University of Kansas, 2007.
- [09]: **B. Linnhoff, D. Mason et I. Wardle**. Understanding Heat Exchanger Networks. *Computers Chemical Engineering*. Vol.3, pp.295-302, 1979.
- [10]: **I.E. Grossmann, J.A. Caballero et H. Yeomans**. Advances in Mathematical Programming for The Synthesis of Process systems. *Latin American Applied Research*. pp 263-283, 2000.
- [11]: **Ebrahim Rezaei et Sirous Shafei**. Heat exchanger networks retrofit by coupling genetic algorithm with NLP and ILP methods. *Computers and Chemical Engineering*. 2008.
- [12]: **Xin X. Zhu**. Automated design method for heat exchanger network using block decomposition and heuristic rules. *Computers and Chemical Engineering*. Vol .21,N°10, pp 1095- 1104, 1997.
- [13]: **R. Ciric et A. Floudas**. Heat Exchanger Network Synthesis Without Decomposition. *Computers Chemical Engineering*. Vol.15, N°6, pp.385-396, 1991.
- [14]: **A. Floudas, R. Ciric et E. Grossmann**. Automatic Synthesis of Optimum Heat Exchanger Network Configurations. *Aiche Journal*, Vol.32, N°2, pp 276-290, 1986.



- [15]: **T.F.Yee et I.E. Grossmann.** Simultaneous Optimisation Models For Heat Integration – II. Heat Exchanger Network Synthesis. *Computers Chemical Engineering*. Vol.14, N°10, pp1165-1184, 1990.
- [16]: **T.F. Yee, I.E. Grossmann et Z. Kravanja.** Simultaneous Optimisation Models For Heat Integration –III. Process and Heat Exchanger Network Optimisation. *Computers Chemical Engineering*, Vol.14, N°11, pp1185-1200, 1990.
- [17]: **Juan M. Zamora et I. E. Grossmann.** A global MINLP optimization algorithm for the synthesis of heat exchanger networks with no stream splits. *Computers chemical Engineering* Vol. 22, N°. 3, pp: 367-384, 1998.
- [18]: **K.C. Furman et Sahinidis.** Computational complexity of heat exchanger network synthesis. *Computers and Chemical Engineering*, pp1371–1390. 2001.
- [19]: **M.A.S.S. Ravagnani, A.P. Silva, P.A. Arroyo et A.A. Constantino.** Heat Exchanger Network Synthesis and Optimisation Using Genetic Algorithm. *Applied Thermal Engineering* pp1003–1017, 2005.
- [20]: **Y. Krishna Mohan et C.V.S. Murty.** Synthesis of Cost-optimal Heat Exchanger Networks using Differential Evolution. *Computers and Chemical Engineering*, 2007.
- [21]: **L. Tantimuratha, A.C. Kokossis et F.U. Muller.** The Heat Exchanger Network Design as a Paradigm of Technology Integration. *Applied Thermal Engineering*. pp1589-1605, 2000.
- [22]: **D.R. Lewin, H. Wang et O. Shalev.** A Generalized Method for HEN Synthesis Using Stochastic Optimization. I: General Framework and MER Optimal Synthesis. *Computers Chemical Engineering*. Vol.22, N°10, pp1503-1513, 1998.
- [23]: **F. Marechal.** Modélisation et optimisation des systèmes énergétiques industriels : Résolution des problèmes d’optimisation. Vol. 29 ; 2002.
- [24]: **Sofiane. Hocine.** Identification de Modèles de Procèdes par Programmation Mixte Déterministe, Toulouse, Thèse de doctorat N° 2423. (2006)
- [25]: **P. Cormault.** Cours de Thermique théorique et pratique, Ecole spéciale de mécanique et d’électricité. Deuxième édition, 1999.
- [26]: **Pascal Tobaly.** Echangeurs de Chaleur .2002.
- [27]: **Yunus A. Çengel,** Heat Transfer. Chapitre 13, Deuxième édition, 2002.
- [28]: **Yves .Jannot.** Transfert Thermique , 2003
- [29]: **T.J.Kotas .** The Exergy Methode of Thermal Plant Analysis
Department of Mechanical Engineering, Queen Mary College, University of London.
1^{ère} Edition.1985.



- [30]: **R. Benelmir, A. Lallemand et M. Feidt.** Analyse exergetique. Technique de l'Ingénieur -Génie énergétique, BE 8 015, pp 1-11.
- [31]: **R.L. Cornelissen.** Thermodynamics and sustainable development, the use of exergy analysis and the reduction of irreversibility. Thèse de **Ph.D**, Edition Febodruk Bv, Enschede, 1997.
- [32]: **G. G. Hirs et R. L. Cornelissen** , Exergetic Optimisation of Heat Exchanger. *Energy Conversion and Management*. Vol. 38, N°. 15-17, pp. 1567-1576, 1997
- [33]: **M. Shukuya et A. Hammache.** Introduction to the Concept of Exergy -for a Better Understanding of Low-Temperature-Heating and High-Temperature-Cooling Systems. Copyright, 2002.
- [34]: **R. Gicquel.** Extrait de "Systèmes Energétiques, tome 1", Presses de l'Ecole des Mines de Paris, Copyrigh 2001-2005 .
- [35]: **A. Lallemand.** Energie, Exergie, Economie Tthermo-économie. Centre de Thermique de Lyon, Journées Internationales de Thermique, France, 2007.
- [36]: **H.Esen, M. Inalli, M. Esena et K.Pihtili.** Energy and exergy analysis of a ground-coupled heat pump system with two horizontal ground heat exchangers. *Building and Environment* 42; pp 3606–3615 , 2007.
- [37]: **B. Suphanit, A. Bischert et P. Narataruksa.** Exergy loss analysis of heat transfer across the wall of the dividing-wall distillation column. *Chemical Engineering, Energy* 32, pp 2121–2134, 2007.
- [38]: **M. Douani, S. Terkhi et F. Ouadjenia.** Distillation of a Complex Mixture. Part II: Performance Analysis of a Distillation Column Using Exergy. Department of Chemical Engineering, University of Mostaganem, Algeria. *Entropy*,9, pp. 137-151, 2007.
- [39]: **A. Dikici et A. Akbulut** . Performance Characteristics and Energy–Exergy Analysis of Solar-assisted Heat Pump System. *Building and Environment* 43, pp 1961–1972, 2008.
- [40]: **M. Pons.** Méthode pour analyse exergetiques robuste d'installation solaire et de bâtiments. Actes International, Building Performance Simulation Association (IBPSA-France) 2008.
- [41]: **Mooson kwauk.** A system for counting variables in separation processes, *Chemical Engineering - Journal* , pp. 240-249, Juin 1956.
- [42]: **H. Nishitani, E. Kunugita et Liang T.Fan.** The vector optimisation of heat exchange. *Journal of Chemical Engireering of Japan*. Vol .15. N°6, pp 475-480, 1982.



- [43]: **F. Marechal**. Energétique avancée et moteurs. École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), 2002.
- [44]: **G. Heyen**. Analyse Exégétique Des Systèmes Industriels, Faculté des Sciences Appliquées Université de Liège, 2000.
- [45]: **M. Douani, A.H. Boudjelthia et A. Achour**. Concept de l'exergie appliqué à l'analyse de la performance d'un condenseur dans une colonne de distillation. Projet de fin d'étude. Université Hassiba Benbouali de Chlef, 2007.
- [46]: **J. Soderman et P. Ahtila**. Optimisation model for integration of cooling and heating systems in large industrial plants. *Applied Thermal Engineering*, 2009.
- [47]: **S. Mottelet**. Optimisation non-linéaire. Université de Technologie de Compiègne, 2003.

Résumé :

La nécessité de recourir aux réseaux d'échangeurs de chaleur (R.E.C) est la solution qu'il y a lieu d'explorer pour réduire la facture énergétique du secteur de l'industrie pétrochimique afin d'exploiter la chaleur localement disponible. Les méthodes traditionnelles de synthèse de réseaux optimaux d'échangeurs de chaleur considèrent le problème sous son aspect économique exclusivement. L'exergie ou la qualité de l'énergie est la fonction que nous avons introduite pour contribuer à la préservation de l'environnement compte tenu des références de son calcul.

L'application de ce concept pour la conception d'un réseau R.E.C optimal a débouché sur deux problèmes : Choix de la source d'énergie et conception de réseau optimal. Pour chaque cas, les calculs développés nous ont permis de minimiser deux fonctions objectifs (surface d'échange et irréversibilités thermodynamiques). L'optimisation du fonctionnement passe par la recherche d'un compromis entre le facteur économique (Surface d'échange) et le flux de la dissipation d'énergie (exergie) dans tout procédé. Les résultats de l'application de la méthode ont montré que le gain en surface s'avère à 30%.

Mots clés : Réseaux d'échangeurs de chaleur, exergie, modélisation, programmation non linéaire, simulation.

Abstract:

The need for heat exchangers networks (H.E.N) is the solution that should be explored to reduce the energy sector of the petrochemical industry to use locally available heat. The methods traditional of synthesis of optimum heat exchangers network consider the problem from the economic aspect. Exergy or the quality of energy is the function that we introduced to help preserve the environment given the references of its calculation.

The application of this concept for the design of an optimum: optimal Choice of an energy source and the optimum synthesis or design of heat exchanger network. For each case, the calculations developed allowed us to minimize both the objectives functions (heat transfer area and thermodynamic irreversibility). The optimization of operation passes by research a compromise between the economic factor (heat transfer area) and the flow of energy dissipation in any process.

Into this work, introduces another criterion of optimization: minimize the loss exergetic to obtain a heat of exchanger network to minimal loss exergetic. Results of our thermodynamic and economic optimization shown that the dissipation of energy available and the total surface of the heat exchangers are in opposition. Thus it is necessary to make a compromise between the minimization of the total heat transfer area and the loss of available energy (irreversibility).

The results of the application of the method showed that the profit surfaces some amounts to 30%.

Key-words: Heat exchanger networks, exergy, modeling, non-linear programming, simulation.

الملخص:

نضرا لإرتفاع فاتورة الطاقة المستعملة في قطاع الصناعة الكيميائية ، فإن اللجوء إلى استعمال شبكات المبادلات الحرارية هو الحل الأمثل لإستخدام الطاقة المتوفرة و بالتالي إقتصادها و عدم ضياعها . هناك العديد من الطرق والأساليب تعالج مشكل تركيب شبكات المبادلات الحرارية ، تستند على مفاهيم من بينها: الفرق بين درجات حرارة التيار البارد و الساخن . و طرق برمجة رياضية ، هذه الطرق تستند على إعتبرات و دوافع إقتصادية فقط ، الهدف منها هو الحصول على تركيب مثالي لشبكة مبادلات حرارية. لكن هذه الطرق لا تأخذ بعين الإعتبار ضياع و تضاول نوعية الطاقة المستعملة في أجهزة التبادل الحراري .

في دراستنا أخذنا بعين الإعتبار ضياع و تضاول الطاقة ، و لهذا عتمدنا على مدلول (exergie) هذا المدلول يجمع بين المبدأ الأول و الثاني في الكيمياء الحرارية.

نتائج تطبيق الطريقة التي تعتمد على مدلول تضاول الطاقة تثبت أن الربح في مساحة

التبادل الحراري يفوق 30 %

الكلمات المفتاحية: شبكات المبادلات الحرارية ، النمذجة ، المحاكاة ، البرمجة الغير خطية.