



# THÈSE

En vue de l'obtention du

## DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par *Institut National Polytechnique de Toulouse*  
Discipline ou spécialité : *Génie des Procédés et de l'Environnement*

---

Présentée et soutenue par *Marianne Boix*  
Le 28 Septembre 2011

Titre : *Optimisation multicritère de réseaux d'eau.*

---

### JURY

*Luc PIBOULEAU – Professeur d'université (Directeur de thèse)*  
*Ludovic MONTASTRUC – Maître de conférences (Co-directeur de thèse)*  
*Jean-Michel RENAUME – Professeur d'université (Rapporteur)*  
*Gilles TRYSTRAM – Professeur d'université (Rapporteur)*  
*Sylvain CAILLOL – Maître de conférences (Examineur)*  
*Serge DOMENECH – Professeur d'université (Examineur)*

---

**Ecole doctorale :** *Mécanique Energétique Génie Civil et Procédés*  
**Unité de recherche :** *LGC, UMR 5503*  
**Directeur(s) de Thèse :** *Luc Pibouveau et Ludovic Montastruc*



## Optimisation multicritère de réseaux d'eau

### Résumé :

Dans cette étude, les cas les plus représentatifs de réseaux d'eau industriels sont optimisés à l'aide d'une procédure de programmation mathématique de façon à proposer des solutions concrètes au plus grand nombre d'industries. Un réseau industriel est composé d'un certain nombre d'unités de procédés, d'unités de régénération et de polluants. Ces différentes unités se caractérisent par des valeurs bien définies : concentrations d'entrée et de sortie maximales en polluant. Le but est ici de déterminer quels sont les courants circulant dans le réseau et de proposer leur allocation entre les unités tout en optimisant plusieurs objectifs. Sont minimisés : le débit d'eau entrant dans le réseau ( $F_1$ ), le débit d'eau régénérée ( $F_2$ ), le nombre de connexions ( $F_3$ ), l'énergie consommée ( $F_4$ ) et/ou le nombre d'échangeurs utilisés ( $F_5$ ). L'optimisation multicritère est basée sur la stratégie epsilon-contrainte développée à partir d'une méthode lexicographique menant à la construction de fronts de Pareto.

Les réseaux d'eau contenant un seul polluant sont abordés grâce à une programmation mathématique mixte linéaire (Mixed Integer Linear Programming, MILP), à l'aide d'une formulation originale basée sur des débits partiels. Les résultats obtenus sont en accord avec la littérature et valident la méthode utilisée. L'optimisation multiobjectif mène à un front de Pareto offrant un grand nombre de solutions. C'est parmi ces solutions qu'un choix est effectué grâce à un nouvel indicateur : le CEG (coût équivalent global). Ce dernier permet d'obtenir un réseau impliquant moins de connexions pour des consommations d'eau équivalentes. Lorsque le réseau fait intervenir plusieurs polluants, le problème est formulé de façon mixte non linéaire (Mixed Integer Non Linear Programming, MINLP). Grâce à la même stratégie que pour les réseaux monopolluants, les réseaux optimisés sont topologiquement plus simple que ceux de la littérature et n'impliquent aucun débit d'eau très faible.

Une procédure MILP est ensuite utilisée dans le cadre de l'optimisation des réseaux d'eau et de chaleur. Plusieurs exemples sont présentés, dont un cas réel concernant une industrie papetière. L'optimisation multiobjectif suivie d'une réflexion d'aide à la décision permet d'améliorer les résultats antérieurs de 2 à 10% en termes de consommation d'eau et de 7 à 15% pour la dépense énergétique.

Cette méthodologie est ensuite étendue à l'optimisation de parcs éco-industriels et permet d'opter pour une solution efficace d'un point de vue à la fois écologique et économique. Parmi les différentes configurations étudiées, c'est celle présentant une unité de régénération individuelle pour chaque industrie qui est choisie car elle implique un gain d'environ 13% pour chacune d'entre elles. Enfin, lorsque le réseau de l'écoparc fait intervenir de la chaleur, c'est un gain de près de 11% qui est obtenu par rapport au cas où les industries fonctionnerait de façon individuelles.

**Mots-clés :** optimisation multicritère, MILP, MINLP, allocation de réseaux d'eau, réseaux d'eau et de chaleur, parcs éco-industriels.



## **Multiobjective optimization of industrial water networks**

### **Abstract:**

This study presents a multiobjective optimization of industrial water networks through mathematical programming procedures. A large range of various examples are processed to propose several feasible solutions. An industrial network is composed of fixed numbers of process units and regenerations and contaminants. These units are characterized by *a priori* defined values: maximal inlet and outlet contaminant concentrations. The aim is both to determine which water flows circulate between units and to allocate them while several objectives are optimized. Fresh water flow-rate ( $F_1$ ), regenerated water flow-rate ( $F_2$ ), interconnexions number ( $F_3$ ), energy consumption ( $F_4$ ) and the number of heat exchangers ( $F_5$ ) are all minimized. This multiobjective optimization is based upon the epsilon-constraint strategy, which is developed from a lexicographic method that leads to Pareto fronts.

Monocontaminant networks are addressed with a mixed linear mathematical programming (Mixed Integer Linear Programming, MILP) model, using an original formulation based on partial water flow-rates. The obtained results we obtained are in good agreement with the literature data and lead to the validation of the method. The set of potential network solutions is provided in the form of a Pareto front. An innovative strategy based on the GEC (global equivalent cost) leads to the choice of one network among these solutions and turns out to be more efficient for choosing a good network according to a practical point of view. If the industrial network deals with several contaminants, the formulation changes from MILP into MINLP (Mixed Integer Non Linear Programming). Thanks to the same strategy used for the monocontaminant problem, the networks obtained are topologically simpler than literature data and have the advantage of not involving very low flow-rates.

A MILP model is performed in order to optimize heat and water networks. Among several examples, a real case of a paper mill plant is studied. This work leads to a significant improvement of previous solutions between 2 to 10% and 7 to 15% for cost and energy consumptions respectively.

The methodology is then extended to the optimization of eco-industrial parks. Several configurations are studied regarding the place of regeneration units in the symbiosis. The best network is obtained when the regeneration is owned by each industry of the park and allows a gain of about 13% for each company. Finally, when heat is combined to water in the network of the ecopark, a gain of 11% is obtained compared to the case where the companies are considered individually.

**Key-words:** multiobjective optimization, MILP, MINLP, water networks allocation, heat networks, eco-industrial parks.



## Préambule

Je souhaite adresser mes remerciements les plus sincères aux nombreuses personnes qui m'ont aidée et accompagnée lors de ces trois années de doctorat.

Je remercie Joël Bertrand ainsi que Béatrice Biscans, de m'avoir accueillie au sein du Laboratoire de Génie Chimique.

Merci à Jean-Michel Reneaume et Gilles Trystram, pour avoir accepté d'être les rapporteurs de ce mémoire. Merci pour leur commentaires et remarques qui m'ont permis d'améliorer la qualité du présent manuscrit.

Je tiens à remercier l'équipe Conception, Optimisation et Ordonnancement de Procédés (COOP) pour m'avoir fait confiance, et ce malgré mes origines universitaires quelque peu atypiques et (en apparence) éloignées du génie des procédés.

Mes plus vifs remerciements vont à mes deux directeurs de thèse Luc Pibouleau et Ludovic Montastruc. Luc, merci pour tout! Merci pour tes conseils et ton expérience, notamment pour les phases de rédaction pour lesquelles tu m'as beaucoup apporté. Ludo, je tiens à te remercier du fond du cœur pour ta disponibilité et ta précieuse aide durant ces trois années. Merci d'avoir su me redonner confiance dans les moments où je doutais le plus, tant sur le plan humain que professionnel.

Je tiens à remercier Serge Domenech pour son aide précieuse et son investissement dans mon travail de thèse. Je remercie également Catherine Azzaro-Pantel pour ses conseils et sa bonne humeur. Enfin, merci à André Davin pour ses précieuses relectures et ses recommandations lors des répétitions.

Un grand merci aux personnes avec qui j'ai pu collaborer dans le cadre de mon monitorat. Je pense notamment à Pascal Floquet, Sébastien Teychené, Michèle Freche, Christèle Combes, Vanessa Durieu, Ahmed Al-Kattan et bien d'autres. Je les remercie vivement pour leur compréhension, leur bonne humeur et leur professionnalisme.

J'embrasse de tout cœur mes collègues et amis du bureau 2-R3-10: Mary, Adama, Guillermo et Dan. Un grand merci pour tous les agréables moments que l'on a passés ensemble et pour cette grande complicité, y compris dans les moments les plus difficiles. J'ai également une pensée amicale pour tous les doctorants du laboratoire et plus particulièrement ceux de l'équipe PSI: Marie & Marie, Juliette, Raul, Sofia, Fernando, Jesus, Ali et les autres. Merci pour la bonne ambiance qui règne dans notre couloir!

Merci aussi à tous mes amis géologues du labo d'à côté de m'avoir soutenue (ils se reconnaîtront), ainsi qu'à Armelle et Guiz (deux fois!) pour leurs cafés et leur gentillesse. Plus particulièrement, merci à Alex pour le tandem de choc que nous avons formés durant les années fac...

Enfin, je voudrais remercier mes proches de m'avoir toujours soutenue. En particulier merci à ma mère, mon père, mes frères (Pierre, Raphaël et Sébastien), mes grands-parents ainsi que tout le reste de la famille. Merci aussi à Martine pour ses petits plats réconfortants. Et évidemment, merci du fond du cœur à Thomas pour son soutien sans faille et ses années de bonheur passées à ses côtés. Je souhaite de continuer notre belle aventure pour de longues années encore...





---

---

# *Table des matières*

---

---

<i>Liste des acronymes</i> .....	13
<b>AVANT-PROPOS</b> .....	<b>15</b>
<b>CHAPITRE I – MOTIVATIONS DE L’ETUDE : ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE ET POSITION DU PROBLEME</b> .....	<b>21</b>
1. <i>Contexte environnemental de l’étude</i> .....	23
1.1 Contexte et enjeux : l’eau dans le monde.....	23
1.2 L’eau et les industries .....	27
1.3 Vers une maîtrise de la pollution industrielle .....	29
1.4 Le problème d’allocation des réseaux d’eau industriels .....	31
2. <i>Les techniques d’intégration des procédés pour l’optimisation des réseaux d’eau..</i>	32
3. <i>Méthodes graphiques pour l’intégration des procédés</i> .....	35
3.1 Analyse du pincement hydraulique.....	35
3.2 Autres techniques.....	37
4. <i>Méthodes d’optimisation mathématique pour l’intégration des procédés</i> .....	38
4.1 Méthodes d’optimisation .....	38
4.2 Les méthodes stochastiques .....	40
5. <i>Modélisation des réseaux d’eau industriels</i> .....	41
5.1 Concept de superstructure.....	42
5.2 Optimisation monocritère .....	42
5.3 Optimisation multicritère .....	47
6. <i>Stratégies utilisées et plan de l’étude</i> .....	48
6.1 Choix de la procédure d’optimisation multicritère .....	48
6.2 Choix de l’algorithme et du logiciel .....	49
7. <i>Plan de l’étude</i> .....	50
<b>CHAPITRE II – ETUDE DES RESEAUX D’EAU MONOPOLLUANTS</b> .....	<b>53</b>
1. <i>Introduction et motivations</i> .....	56
2. <i>Formulation générale (MINLP)</i> .....	58
2.1 Superstructure .....	58
2.2 Formulation.....	59
2.3 Développement d’une méthode d’optimisation multiobjectif.....	65
2.4 Cas des réseaux complexes .....	67
3. <i>Formulation MILP : cas des réseaux d’eau monopolluants</i> .....	68
3.1 Phase de formulation et de définition .....	68
3.2 Phase de validation .....	73
4. <i>Conclusion</i> .....	83
<b>CHAPITRE III – ETUDE DES RESEAUX D’EAU MULTIPOLLUANTS</b> .....	<b>85</b>
1. <i>Formulation du problème d’allocation d’un réseau multipolluant</i> .....	88
2. <i>Résolution du problème multiobjectif</i> .....	89
3. <i>Comparaison des réseaux multipolluants vs monopolluants</i> .....	90
4. <i>Etude de différents exemples</i> .....	93
4.1 Réseau extrait de Wang et Smith (1994).....	93
4.2 Réseau de Feng et al. (2008).....	94
4.3 3 <sup>ème</sup> étude : réseau de Feng et al. (2008) .....	97

5. Conclusion.....	107
<b>CHAPITRE IV – OPTIMISATION DE RESEAUX D’EAU ET DE CHALEUR.....</b>	<b>109</b>
1. Allocation de réseaux d’eau et de chaleur .....	113
1.1 Formulation du problème.....	113
1.2 Méthode de résolution du problème multiobjectif .....	115
1.3 Premier exemple d’application : 8 procédés .....	116
2. Intégration des réseaux d’eau et de chaleur .....	120
2.1 Formulation du problème.....	120
2.2 Exemple d’application .....	124
3. Optimisation multiobjectif d’un cas réel industriel.....	129
3.1 Transformation du problème original .....	129
3.2 Allocation du réseau d’eau et de chaleur .....	135
3.3 Intégration énergétique .....	141
4. Conclusion.....	143
<b>CHAPITRE V – OPTIMISATION DE RESEAUX D’EAU DANS UN CADRE D’ECOLOGIE INDUSTRIELLE : APPLICATION AUX ECO-PARCS.....</b>	<b>147</b>
1. Travaux antérieurs dans le domaine de l’écologie industrielle .....	150
2. Optimisation d’un réseau d’eau d’un parc éco-industriel .....	153
2.1 Définition du problème .....	153
2.2 Stratégie d’optimisation multiobjectif .....	155
2.3 Présentation de l’EIP étudié.....	157
2.4 Etude des cas de base (1 et 5) : entreprises sans lien avec les autres .....	160
2.5 Parc éco-industriel sans unités de régénération (Cas 2, 3 et 4) .....	162
2.6 Parc éco-industriel avec une unité de régénération par entreprise (Cas 6, 7 et 8).....	164
2.7 Parc éco-industriel avec une unité de régénération commune (Cas 9 à 13).....	167
2.8 Discussion.....	168
3. Réseau d’eau et de chaleur au sein d’un parc éco-industriel .....	171
3.1 Formulation du problème.....	171
3.2 Présentation de l’étudié.....	171
3.3 Résultats des optimisations .....	172
4. Conclusion.....	177
<b>CHAPITRE VI – CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....</b>	<b>181</b>
Conclusions.....	183
Perspectives .....	187
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>191</b>



## **Liste des acronymes**

AA	Abeilles Artificielles
AG	Algorithme Génétique
BONMIN	Basic Open-source Nonlinear Mixed INteger programming
CEG	Coût Equivalent Global
CF	Colonie de Fourmis
COIN	COmputational INfrastructure
COUENNE	Convex Over and Under ENvelopes for Nonlinear Estimation
CPU	Central Processing Unit
EIP	Eco-Industrial Park (parc éco-industriel)
EP	Essaim de Particules
GAMS	General Algebraic Modelling System
IP	Intégration des procédés
LP	Linear Programming
MCDM	Multicriteria Choice Decision Making
MI	Méthode Immunitaire
MILP	Mixed-Integer Linear Programming
MINLP	Mixed-Integer NonLinear Programming
M-TOPSIS	Modified - Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Situation
NCE	Nombre de Connexions Equivalent
NLP	NonLinear Programming
RN	Réseau de Neurones
RS	Recuit Simulé
TOPSIS	Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Situation
WS	Weighted Sum
$\varepsilon$ -C	Epsilon Constraint



---

---

*Avant-propos*

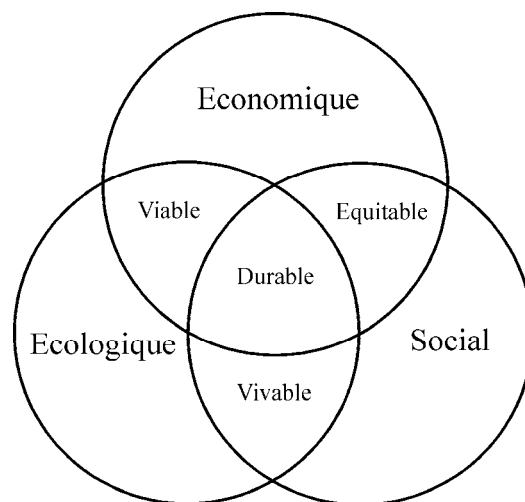
---

---





En 2009, à l'issue d'un rapport de l'Organisation des Nations Unies, son directeur général, Koïchiro Matsuura déclare : *" Dans un contexte marqué par des pénuries croissantes, une bonne gouvernance est plus que jamais essentielle à la gestion de l'eau. La lutte contre la pauvreté dépend aussi de notre capacité à investir dans cette ressource."* Depuis quelques décennies, la société prend ainsi conscience que les nombreuses ressources primaires, pensées jusqu'alors inépuisables, sont désormais à préserver. Le phénomène de mondialisation, étroitement lié à celui de l'augmentation de la population, est de plus en plus présent et de nouveaux concepts globaux émergent, tel que celui de **développement durable**. Ce concept avait été initialement évoqué en 1987 par la Commission mondiale sur l'environnement et le développement, dans le rapport Brundtland. Les trois piliers de ce concept regroupent des aspects environnementaux, sociaux et économiques, tel que l'illustre la figure 1.



**Figure 1. Interactions des trois piliers du concept de développement durable.**

L'action pour le développement durable se situe à de nombreuses échelles de la société. Particulièrement, le monde industriel sert de moteur dans cette optique à travers diverses normes internationales telles que l'ISO 14001 (environnement), l'ISO 9001 (qualité) ou encore le guide SD 21000 (développement durable dans les entreprises). Cette étude se situe entièrement dans cette démarche puisqu'elle consiste à concevoir des réseaux d'**eau** industriels, respectueux de l'environnement et satisfaisant un certain nombre de critères économiques et topologiques.

Ces travaux ont été réalisés au sein du **Laboratoire de Génie Chimique** (UMR CNRS/INP/UPS 5503), et plus particulièrement dans l'équipe **COOP** (Conception, Optimisation et Ordonnancement des Procédés) du département **PSI** (Procédés et Systèmes Industriels). Le thème général de recherche de l'équipe COOP concerne l'optimisation et la conception de procédés, et dans ce cadre émerge de façon importante la classe des problèmes mixtes, qui contiennent des variables continues (conditions opératoires) et des variables entières (structure du procédé), voire des variables de décision. La démarche s'inscrit ainsi de façon prépondérante dans le développement de stratégies d'optimisation en variables mixtes, impliquant ou associant des méthodes stochastiques ou déterministes. Plusieurs travaux de thèse réalisés au sein de l'équipe depuis 2005 ont étudié les possibilités de résolution de ces différentes méthodes à travers leur application à des réseaux complexes. Il s'agit notamment des réseaux de transport de gaz (Ponsich, 2005 ; Tabkhi, 2007 ; Gugenheim, 2011) ou encore des mélanges hydrogène/gaz naturel (Hernandez, 2011). Ainsi, ce travail s'inscrit dans cette continuité puisqu'il propose d'étendre les études de l'équipe au cas des réseaux d'eau industriels.

Les objectifs qui ont conduit à la rédaction de ce mémoire sont multiples :

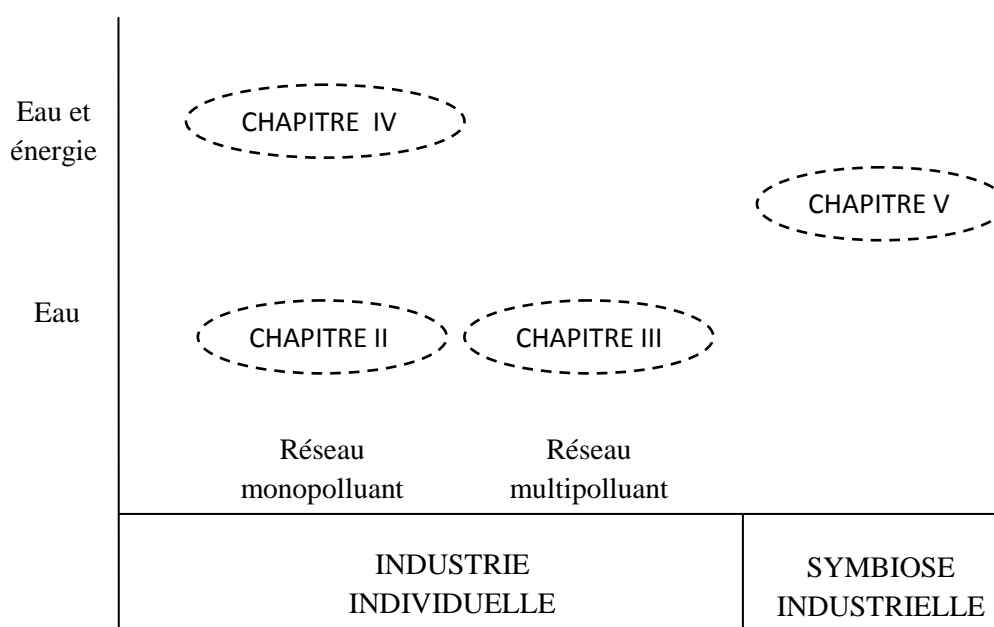
- **Formuler** le problème mathématiquement dans un premier temps, puis numériquement ensuite, pour le cas particulier des réseaux d'eau.
- **Proposer** une stratégie de résolution fiable et applicable à des réseaux de taille industrielle.
- **Développer** une méthode d'optimisation permettant la prise en compte de nombreux critères antagonistes.
- Balayer un **spectre plus large** d'applications industrielles en adaptant la méthode aux réseaux d'eau et d'énergie.

La finalité de ces différents objectifs est de s'orienter vers une perspective d'**écologie industrielle**, au travers d'études de symbioses industrielles, qui représentent un des grands défis de la société contemporaine. Le manuscrit est composé de six chapitres s'articulant comme suit, tel que cela est illustré par la figure 2 :

- Le **chapitre I** présente une analyse bibliographique concernant l'intégration des procédés pour l'étude des réseaux d'eau. Il positionne le problème, les

motivations, et permet de choisir les méthodes utilisées pour la résolution du problème.

- Le **chapitre II** consiste en l'étude des réseaux d'eau avec un seul polluant (désigné par réseau monopolluant).
- Le **chapitre III** étudie le cas des réseaux d'eau industriels incluant plusieurs polluants (désigné par réseau multipolluant).
- Le **chapitre IV** étend les méthodologies utilisées dans le chapitre II au cas des réseaux d'eau et d'énergie. Il est illustré par un exemple issu de l'industrie papetière.
- Le **chapitre V** est dédié à l'extension de la méthode d'optimisation au cas des parcs éco-industriels dans un contexte global d'écologie industrielle. Les réseaux d'eau et d'énergie sont étudiés pour divers regroupements d'entreprises.
- L'analyse de l'ensemble des travaux et résultats est mentionnée en conclusion, et certaines perspectives pour la conduite de futures études sont formulées dans le **chapitre VI**.



**Figure 2. Thèmes des chapitres du manuscrit.**



---

---

*CHAPITRE I – Motivations de l'étude :  
analyse bibliographique et position du  
problème*

---

---

## Nomenclature du chapitre

$f$	fonction objectif de $R^{n_1} \times [0, 1]^{n_2}$ dans $R$
$f_i$	$i^{\text{ème}}$ fonction objectif de $R^{n_1} \times [0, 1]^{n_2}$ dans $R$ (cas multicritère)
$g(x)$	vecteur des contraintes inégalité (dimension $m$ )
$h(x)$	vecteur des contraintes égalité (dimension $p$ avec $p < n_1 + n_2$ )
$k$	nombre de fonctions objectif (cas multicritère)
$m$	nombre de contraintes inégalité
$n_1$	nombre de variables réelles
$n_2$	nombre de variables binaires
$p$	nombre de contraintes égalité
$x$	vecteur des variables ( $\in R^{n_1} \times [0, 1]^{n_2}$ )

## 1. Contexte environnemental de l'étude

### 1.1 Contexte et enjeux : l'eau dans le monde

La quantité d'eau douce dans le monde est finie et renouvelable mais sa distribution à la surface de la Terre n'est pas homogène et varie de façon considérable. Ces variations sont principalement contrôlées par des épisodes successifs de gel/dégel, d'évaporation/précipitation ainsi que par l'évapotranspiration forestière et le ruissellement. La figure I-1a illustre le cycle hydrologique naturel terrestre. La majorité de l'eau présente sur Terre est de l'eau de mer, seuls 2.5 % du total sont constitués par l'eau douce. Les activités anthropiques sont devenues le premier facteur contrôlant les systèmes hydrologiques de notre planète (UNESCO, 2009). Ces pressions sont le plus souvent liées au développement humain ainsi qu'à la croissance économique ; de fait, le cycle hydrologique naturel s'en trouve modifié tel que l'illustre la figure I-1b.

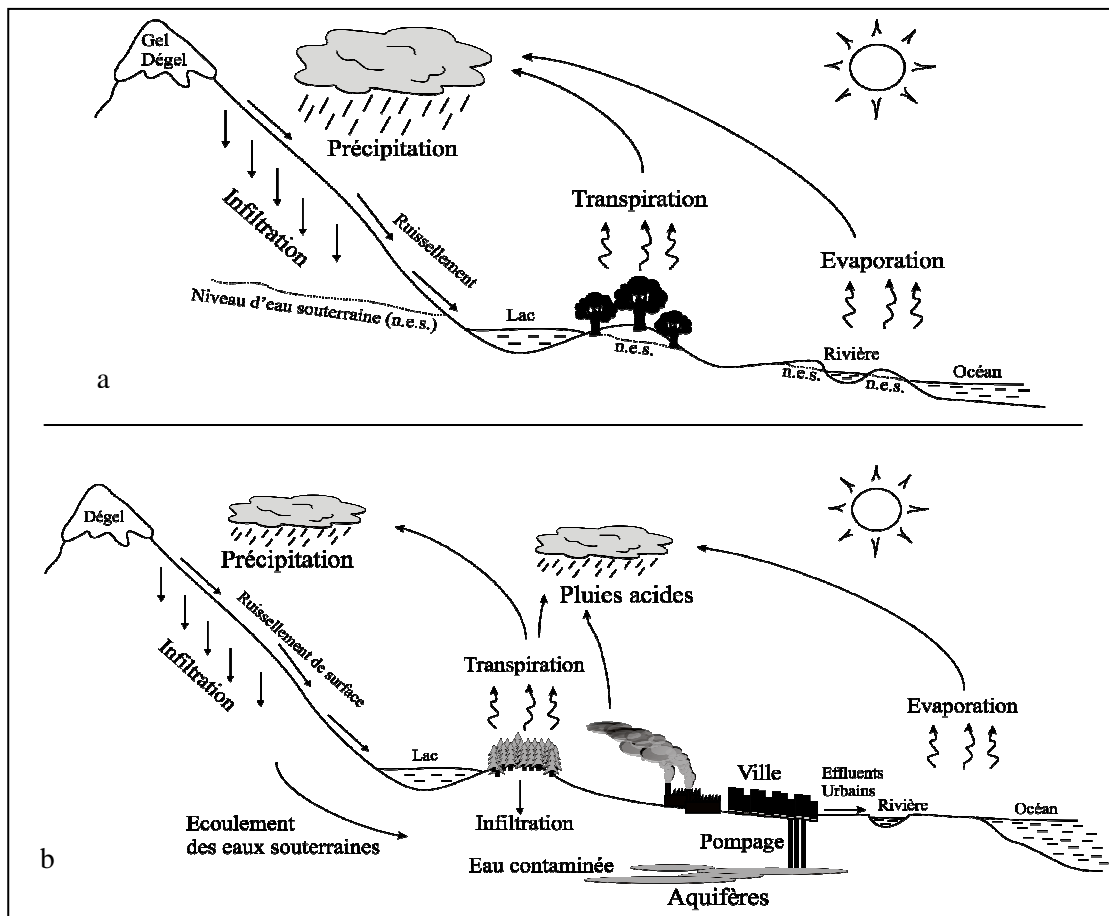


Figure I-1. Cycles hydrologiques sur Terre.

a. Composantes naturelles du cycle. b. Interaction des activités humaines sur le cycle naturel.

D'après un récent rapport de l'UNESCO (2009), la quantité totale d'eau douce annuelle utilisée par l'Homme est estimée à environ 4000 km<sup>3</sup> par an, tous usages confondus (domestiques, industriels, agricoles). A cette valeur s'ajoutent 6400 km<sup>3</sup> d'eau de pluie directement utilisés par l'agriculture. Bien sûr, la quantité d'eau consommée à travers le Monde est fortement dépendante de la démographie (et implicitement du niveau de vie de chacun). L'accroissement démographique actuel est estimé à 80 millions d'humains supplémentaires chaque année (UNESCO, 2009), conduisant logiquement à multiplier les interactions entre l'Homme et la nature dans le temps. Si la croissance démographique reste stable, nous devrions être plus de 8 milliards d'individus sur Terre d'ici l'an 2025 (PRB, 2009). Cet accroissement de population induira donc une intensification des activités agricoles, industrielles et domestiques, et par conséquent, une augmentation générale de la consommation d'eau douce. Ainsi, les quantités d'eau consommées devraient augmenter de 64 km<sup>3</sup> par an, compte tenu du développement actuel de la population (UNESCO, 2009).

Parallèlement à cette demande en forte croissance, la distribution des ressources en eau à la surface de la Terre n'est pas homogène et bien souvent, ce sont les régions qui sont les plus dépourvues en eau qui en sont les plus importantes consommatrices (Figure I-2). Le volume total d'eau douce utilisable s'élève à environ 12500 km<sup>3</sup> et si cette quantité était équitablement répartie, elle serait probablement suffisante pour satisfaire tous les besoins anthropiques (OECD, 2008). La figure I-2 montre que les cinq pays utilisant le plus d'eau (en volume) sont l'Inde, la Chine, les Etats-Unis, le Pakistan et le Japon (OECD, 2008). Neuf pays se partagent plus de 60% des ressources en eau douce. Par conséquent, des écarts considérables s'observent entre les différentes consommations allant de 646 km<sup>3</sup> par an pour l'Inde à moins de 0.003 km<sup>3</sup> par an en Tanzanie, par exemple.

De plus, les modifications climatiques dues aux activités anthropiques s'accompagnent d'une dénaturation des réverses d'eau douce, d'une diminution du niveau des précipitations, ainsi que d'un accroissement de la superficie des zones désertiques, créant ainsi des besoins accrus en eau douce.



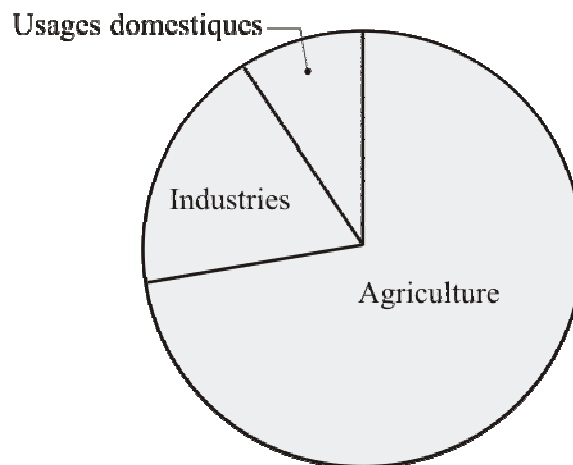


**Figure I-2. Ressources (a) et consommation (b) d'eau dans le monde en 2005 (FAO-AQUASTAT, 2010).**

D'ici 2025, environ 2,7 milliards de personnes devraient faire face à un manque sévère d'eau, appelé aussi « stress hydrique » (BBC News Online, 2004). A l'heure actuelle, près de deux milliards d'habitants vivent d'ores et déjà avec moins de cinq litres d'eau par jour tandis que dans les pays industrialisés, un habitant consomme dix-huit fois plus d'eau en moyenne chaque jour (World Water Council, 2010). De nombreuses solutions peuvent être apportées

pour faire face à cette pénurie, mais auparavant il est important de connaître les principaux secteurs concernés.

Trois types d'activités se partagent la consommation totale de l'eau à l'échelle planétaire (Figure I-3). L'agriculture représente de loin le principal utilisateur d'eau, avec environ 70% de la consommation mondiale. Cette valeur peut atteindre 80% dans certaines régions du globe comme en Asie ou en Afrique. Le secteur industriel, en forte croissance dans les pays en voie de développement, représente actuellement 20% de l'utilisation totale, tandis que les 10% restants sont attribués aux usages domestiques (FAO-Aquastat, 2010). Cependant, dans les pays développés la tendance peut s'inverser passant à une consommation industrielle de 60% et 30% pour les usages agricoles.



**Figure I-3. Répartition moyenne de la consommation d'eau entre les différents secteurs.**

Depuis une dizaine d'année, les problèmes liés à la pénurie d'eau sont ainsi devenus une préoccupation majeure pour l'ensemble de la population et une priorité pour les autorités publiques (IFEN, 2006). Dans les années à venir, trois axes prioritaires sont à développer et à améliorer pour proposer des solutions tant au niveau de la qualité que de la quantité de l'eau douce:

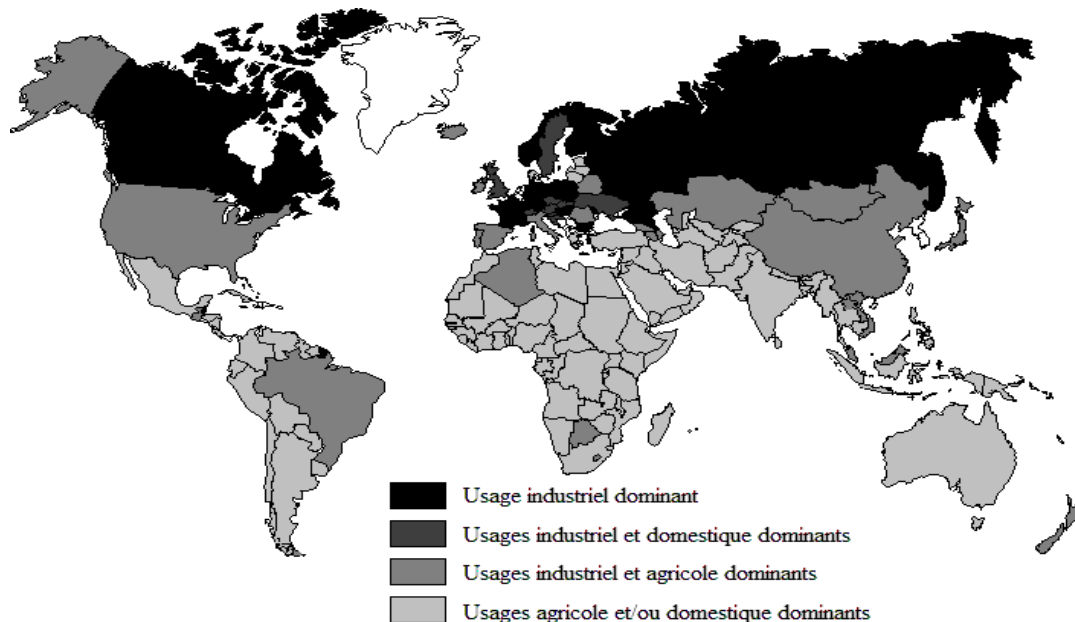
- 1) Réduire son utilisation et limiter sa pollution.
- 2) Augmenter les ressources en eau (Dessalement, Réutilisation, Recyclage...).
- 3) Lutter contre la présence de polluants émergents (Identification, Détection, Elimination...).

## 1.2 L'eau et les industries

### 1.2.1 La consommation d'eau industrielle globale

Bien que la consommation d'eau industrielle ne représente pas la majeure partie de l'utilisation totale de l'eau (Figure I-3), elle demeure largement majoritaire dans de nombreux pays industrialisés (Figure I-4).

Cette étude a pour but de répondre à l'objectif premier des autorités ; il consiste à proposer des solutions concernant la réduction de l'utilisation de l'eau et a pour thème les réseaux d'eau industriels.



**Figure I-4. Secteurs dominant l'utilisation de l'eau dans le monde (World Resources Institute, 2009).**

Il est d'abord nécessaire d'effectuer un état des lieux des relations entre le monde industriel et l'eau. Deux constats s'imposent : l'eau est indispensable à la vie sur Terre et le développement industriel est toujours dépendant de la disponibilité de l'eau (Crini et Badot, 2007). Passer de la production artisanale à la production industrielle a permis à l'humanité de surmonter de nombreux obstacles et d'améliorer son mode de production. Cependant, l'industrialisation croissante nécessite l'utilisation de grandes quantités d'eau, générant une

pollution importante des effluents aqueux. Il est communément admis qu' « accepter d'utiliser l'eau douce c'est aussi accepter de la polluer » (Boeglin, 2001). Parmi les trois pôles consommateurs d'eau douce décrits plus haut, l'industrie est à l'origine du plus fort impact environnemental, principalement en raison de la variété, du volume et de la toxicité des polluants émis. Dans la plupart des cas, les dégradations environnementales sont dues à un manque ou une absence de traitement approprié des eaux usées avant les rejets (Gavrilescu et al., 2008).

La conception de réseaux d'eau industriels efficaces peut considérablement réduire tant la consommation d'eau fraîche que le rejet d'eau usée. La recherche de réseaux d'eau mieux conçus et adaptés au secteur industriel représente ainsi un challenge scientifique concret visant à neutraliser les activités polluantes tout en maintenant la productivité et la compétitivité des entreprises. De nombreuses contributions ont déjà permis d'améliorer les critères environnementaux des industries depuis une quinzaine d'années. Idéalement, c'est un rejet nul d'eaux polluées (circuit fermé) qui est visé d'ici 2020 selon les nouvelles directives européennes (2455/2001/CE et 2000/60/CE).

### 1.2.2 L'utilisation de l'eau dans les industries

Différents secteurs se partagent les 20% de la consommation totale industrielle. La figure I-5 illustre la répartition de la consommation d'eau parmi ces différents secteurs industriels. Les valeurs données sur la figure I-5 sont des moyennes mondiales et il est important de garder à l'esprit qu'elles varient considérablement d'une région du monde à l'autre (UNESCO, 2009).

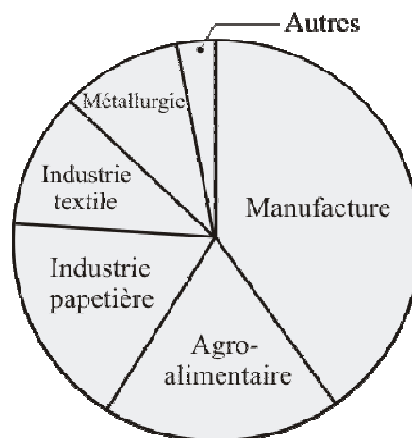


Figure I-5. Répartition de la consommation d'eau industrielle parmi les principaux secteurs.

Bien que les secteurs mis en jeu soient divers, les usages de l'eau restent souvent identiques :

- Dans les opérations de lavage, où elle assure le rôle de fluide de nettoyage des équipements en y assurant le rôle de « solvant » de la salissure.
- En tant qu'agent de transport des produits finis et des polluants.
- Durant les étapes de fabrication : en tant que solvant, diluant ou encore comme matière première.
- Enfin, elle est aussi utilisée en tant que conducteur thermique dans les circuits de chauffage et de refroidissement d'une usine (sous forme d'eau chaude, d'eau froide ou encore de vapeur).

Dans la pratique, l'eau des réseaux industriels peut également subir des changements d'état passant de l'eau liquide à vapeur lors de certaines opérations. Enfin, d'un secteur à l'autre, seul l'aspect quantitatif de ces utilisations est susceptible de varier. La diversité des usages de l'eau dans les industries implique des contraintes très variées concernant la qualité de l'eau utilisée. En effet, la qualité exigée varie selon que l'eau est utilisée pour le procédé, le lavage ou des échanges thermiques. Il paraîtrait évident que les industries ne doivent pas nécessairement utiliser de l'eau potable, mais malheureusement les eaux souterraines ou les eaux de surface ne satisfont que très rarement les contraintes demandées (Boeglin, 2007). Ainsi, les petites et moyennes entreprises alimentent leur réseau avec l'eau potable publique qui est la plus polyvalente en termes d'utilisation, car la plus propre. Ce n'est qu'occasionnellement que quelques grandes industries, lorsqu'elles possèdent une implantation propice, utilisent d'autres ressources (eau de mer, de rivière voire de forage).

### ***1.3 Vers une maîtrise de la pollution industrielle***

En France, c'est en 1964 (Loi n° 64-1245) que la première loi concernant la gestion des ressources en eau a été adoptée. Elle stipule qu'une aide financière peut être octroyée aux personnes morales (par exemple, les industries) lorsqu'une lutte contre la pollution (modification physico-chimique de l'eau) des eaux naturelles est engagée. Depuis, la loi de 1992 (Loi n° 92-3) et la législation récente (Loi n°2006-1772) sont venues compléter ce texte. Proposer des solutions faisables aux industries fait partie des principaux objectifs de ce travail. Cependant, il est nécessaire de connaître dans quel type d'action l'étude se situe et la

nature des autres aides qui peuvent être apportées aux industriels. Il existe trois types d'actions se distinguant les unes des autres par leur situation au sein de la chaîne de production.

### *1.3.1 Actions préventives*

En amont de la chaîne de production, c'est-à-dire avant la mise en place des équipements de production, un investissement de la part des industriels doit être réalisé en intégrant les contraintes environnementales au stade de conception, ceci peut inclure (Boeglin, 2007):

- L'achat d'unités de régénération et la prévision d'un réseau permettant le recyclage et la réutilisation des eaux usées.
- Les techniques d'intégration des procédés, conduisant à une allocation de manière à ce que le procédé fonctionne tout en économisant les ressources naturelles.

Ce type d'action peut aussi être mis en œuvre lorsque l'usine existe déjà et qu'elle nécessite une amélioration de sa gestion. Dans ce cas, une restructuration des réseaux, des contrôles réguliers de la qualité des rejets ou encore, plus simplement, une amélioration des pratiques propres à l'entreprise peuvent être proposés.

### *1.3.2 Actions curatives*

La complexité et la diversité des rejets industriels induit la mise en œuvre de nombreuses techniques visant à dépolluer l'eau avant son rejet dans l'environnement. Dans la plupart des cas, la première étape consiste à éliminer la pollution insoluble présente dans les eaux résiduaires industrielles à travers divers procédés :

- Le dégrillage : élimination des débris de taille importante.
- Le dessablage : élimination des particules en suspension (décantation).
- L'écumage : suppression des phases légères principalement et des mousses surnageant (substances hydrophobes et hydrocarbonées).
- Le séparateur spécifique aux hydrocarbures dispersés (débourbeur et déshuileur).

La seconde étape consiste à éliminer la pollution dissoute par le biais de traitements physiques ou physico-chimiques. Ceci est le plus souvent réalisé par précipitation et filtration afin d'éliminer le plus souvent des métaux lourds (ONEMA, 2009). Enfin, la dégradation de

matière organique par des bactéries est réalisée par voie aérobie ou anaérobie lors des traitements par voie biologique.

#### ***1.4 Le problème d'allocation des réseaux d'eau industriels***

L'objectif de ce travail s'inscrit dans la catégorie des actions préventives car il consiste à concevoir des réseaux d'eau industriels propres. La démarche adoptée vise à concevoir une allocation optimale des réseaux d'eau étudiés. Cela consiste à définir parfaitement (en termes de débits d'eau et de concentrations en polluants) les différents courants liant toutes les unités (de procédé ou de régénération) entre elles. En outre, il s'agit également de connaître quels sont les courants existants (topologie) de manière à ce que le réseau fonctionne ; c'est-à-dire qu'il satisfasse les contraintes qui lui sont imposées tout en minimisant un ou plusieurs objectifs.

Les contraintes imposées sont généralement de deux types : celles dominées par les équations de bilans (eau, polluants) se présentant sous forme d'égalités et les équations de type inégalité. Ce sont les limites propres à chacune des unités composant le réseau qui déterminent ces dernières. En effet, chaque unité de procédé possède des limites concernant les concentrations en polluants et/ou les débits d'eau nécessaires à son bon fonctionnement. Des ordres de grandeurs disparates : le ppm pour les concentrations en polluants et souvent les T/h pour les débits d'eau imposent une résolution « parfaite » des différentes équations de bilan. Concernant les objectifs, il en existe de différents types pouvant être pris en compte :

- Le plus courant est la minimisation de l'eau fraîche alimentant le réseau (Savelski et Bagajewicz, 2003 ; Feng et al., 2008 ; de Faria et al., 2009 ; Tudor et Lavric, 2010). Etant donné le contexte environnemental actuel, il devient urgent de proposer des solutions qui impliquent un débit d'eau minimal. En effet, chaque réseau possède une « valeur-cible » représentant la valeur minimale du débit d'eau fraîche permettant son fonctionnement ; c'est cette valeur que l'on cherche à obtenir lorsque ce critère est minimisé.
- Le deuxième objectif le plus répandu est un critère de coût total (Bogataj et Bagajewicz, 2008 ; Dong et al., 2008 ; Jezowski, 2008). L'expression de cet objectif varie et ne s'exprime donc pas toujours de la même manière dans les différentes études. De façon commune, il prend en compte plusieurs composantes :

a) un coût d'investissement : coût des différentes connexions et de l'achat des unités de traitement ; b) un coût de fonctionnement : lié à l'utilisation de l'eau fraîche et au débit d'eau nécessitant d'être traité. En fonction des problèmes étudiés, des termes peuvent être ajoutés de façon à décrire au mieux ce critère.

- Bien qu'importante, la topologie du réseau ou en d'autres termes sa complexité, n'est pas souvent prise en compte dans les études antérieures (Feng et al., 2008). Il est cependant nécessaire de proposer des solutions qui ne soient pas aberrantes ; c'est-à-dire qui soient simples d'un point de vue topologique.
- Enfin, selon les études, le débit d'eau régénérée (Boix et al., 2010, 2011), la concentration en sortie de l'unité de régénération (Feng et al., 2008) ou encore la concentration en polluant des effluents peuvent être considérés.

Finalement, deux types de réseaux existent dans la littérature : les réseaux d'eau monopolluants et ceux en contenant plusieurs. Les premiers sont, par exemple, ceux rencontrés dans les industries des pâtes et papiers. En effet, ce type d'industrie utilise de très grandes quantités d'eau et les matières en suspension (fibres de bois de différentes tailles) sont considérés comme l'unique polluant. Les industries de peinture ou encore celles fabriquant l'acier et les semi-conducteurs prennent également en compte un seul polluant (Bagajewicz et Savelski, 2001). Les autres, celles impliquant plusieurs polluants, représentent notamment les raffineries, au sein desquelles circulent des sels, des hydrocarbures ou des solides en suspension ; mais aussi, les industries pétrochimiques ou encore les industries textiles ou agroalimentaires.

Afin de mener à bien ce problème d'allocation de réseaux d'eau, et afin de le situer par rapport aux études antérieures, un état de l'art des techniques disponibles d'intégration des procédés est exposé ci-après.

## **2. Les techniques d'intégration des procédés pour l'optimisation des réseaux d'eau**

Le concept d'intégration des procédés (IP) consiste en une approche systémique ayant pour objectif premier la réduction de l'utilisation des ressources naturelles au sein de



complexes industriels (El-Halwagi, 2006). Les ressources naturelles considérées dépendent du domaine industriel étudié et sont en général représentées par l'eau, l'énergie ou d'autres matières premières. Enfin, l'intégration des procédés vise également une réduction des émissions de gaz à effet de serre ainsi qu'une minimisation des rejets d'effluents pollués dans l'environnement (Dunn et El-Halwagi, 2003). Récemment, les méthodologies mises en œuvre pour concevoir un système industriel ont pris en compte l'aspect environnemental de la solution en évaluant son coût pour l'entreprise (coûts d'opération et d'investissement,...) (Taal et al., 2003).

L'intégration des procédés étant une méthodologie générale, ses concepts permettent d'être utilisés dans de nombreuses branches d'industries chimiques : raffineries (Takama et al., 1980 ; Savelski et al., 1999), pétrochimie (Mann et Liu, 1999), industries des pâtes et papiers (Yang et al., 2000 ; Jacob et al., 2002 ; Manan et al., 2006), agroalimentaire (Klemes et al., 1999 ; Thevendiraraj et al., 2003) ou encore dans le textile (Wenzel et al., 2002). Les techniques d'intégration des procédés peuvent être utilisées soit pour concevoir une industrie, c'est alors un problème d'allocation de réseau (Feng et al., 2008); soit pour améliorer (retrofit) un procédé déjà existant (Zhu et al., 2000 ; Du et al., 2004). Dans les deux cas, une intégration des procédés doit mener à répondre aux questions suivantes :

- Quels sont les courants d'eau pouvant être directement réutilisés ?
- Quelle est la charge optimale en polluant que chaque courant d'eau doit transporter ?
- Quelle est la configuration optimale du système dans sa globalité ?
- Quelle est la meilleure façon d'allouer les courants d'eau allant d'une unité à une autre ?

C'est à la fin des années 70 et dans les années 80 que les premières contributions systémiques ont vu le jour dans le but de proposer des outils pour l'intégration des procédés au sein des réseaux d'échangeurs de chaleur (Heat Exchanger Network – HEN) (Linnhoff et Flower, 1978 ; Linnhoff et al., 1979, 1982; Linnhoff et Hindmarsh, 1983 ; Belkebir et al., 1989 ; Guiglion et al. 1989a, 1989b). L'application de ces outils à la conception des réseaux d'eau a débuté en 1980 avec le travail de Takama et al. (1980). Ce sont les premiers auteurs à avoir formulé un problème d'allocation de réseaux d'eau incluant des unités de procédé et de régénération dans une raffinerie pétrochimique. Ils ont aussi été les premiers à utiliser une technique d'optimisation basée sur le concept de superstructure pour traiter le problème. Suite

à ce travail, ce n'est qu'une quinzaine d'années plus tard qu'une série de publications concernant la conception de réseaux d'eau est apparue, débutant avec une étude significative de Wang et Smith (1994).

Afin de minimiser l'approvisionnement en eau, et également le rejet d'eaux usées d'un réseau d'eau industriel, trois importantes technologies sont utilisées lors de sa conception /amélioration (Iancu, 2007 ; Feng et al., 2008):

- En réutilisant directement (lorsque cela est possible) les eaux usées sortant des unités de procédés vers ceux pouvant accepter une eau de telle nature (Reuse).
- En traitant l'eau utilisée dans les procédés via une unité de régénération avant qu'elle ne soit rejetée dans l'environnement et en autorisant la réutilisation entre procédés comme dans le premier cas (Regeneration reuse).
- En traitant et recyclant l'eau : dans ce cas, les unités de procédés réutilisent l'eau venant d'être traitée par l'unité de régénération ainsi que celle des unités de procédé (Regeneration recycling) (Figure I-6).

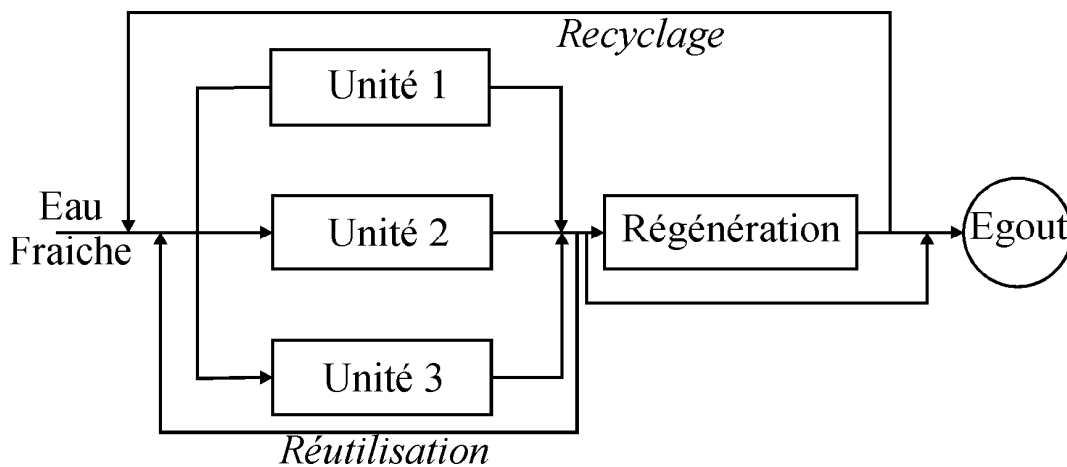


Figure I-6. Schéma d'un réseau impliquant un traitement, une réutilisation et un recyclage de l'eau (Feng et al., 2008).

Pour mémoire, signalons enfin le principe à l'origine d'industries « propres » qui consiste à essayer de retirer la pollution de la matière première (et à la valoriser séparément) avant d'entreprendre le procédé proprement dit (cas des industries d'évacuation d'amidon). Dans cette étude, c'est le troisième cas qui est considéré car de tels réseaux peuvent considérablement réduire la consommation d'eau fraîche et le rejet des eaux usées. De plus,

ce type de réseaux incluent des solutions pour lesquelles le rejet zéro est réalisable puisque l'eau est réutilisée au sein du même réseau.

Les outils disponibles pour l'intégration des procédés sont divers et regroupent de nombreuses techniques. Cependant, ces dernières peuvent être classifiées en deux grands groupes : les approches graphiques et les techniques d'optimisation mathématique.

- *Approches graphiques* : elles sont basées sur des principes thermodynamiques et prennent en compte la quantité de charge transférée au sein des courants d'eau entre les différents procédés. Leur application nécessite deux étapes : trouver dans un premier temps le minimum de la consommation d'eau fraîche pour tout le réseau puis dans un second temps, une fois que la valeur cible est déterminée, il s'agit de concevoir la topologie du réseau (Wang et Smith, 1994).
- *Techniques de programmation mathématique* : l'optimisation est un autre outil disponible pour l'intégration des procédés. Elle conduit à la détermination des « meilleures » solutions parmi un très grand ensemble de possibilités (El-Halwagi, 2006). Des algorithmes spécifiques sont utilisés dans le but de générer cet ensemble de solutions répondant à des contraintes précises et satisfaisant une ou plusieurs fonctions objectifs.

### **3. Méthodes graphiques pour l'intégration des procédés**

#### ***3.1 Analyse du pincement hydraulique***

La méthode, essentiellement graphique, se résume en deux principales étapes : répertorier les courants « demande » et « source », et estimer les débits et concentrations du polluant dans chacun des courants. Deux courbes sont ainsi tracées dans un diagramme « charge polluante /débit », une pour les sources et l'autre pour les demandes (Figure I-7). En faisant « coulisser » les deux courbes l'une vers l'autre jusqu'à ce qu'elles se touchent sans se croiser, on atteint le point de pincement (Wang et Smith, 1994, 1995). Ce point indique plusieurs informations :

- La quantité suffisante et minimale d'eau fraîche à fournir au procédé.
- La quantité maximale d'eau usée à rejeter.

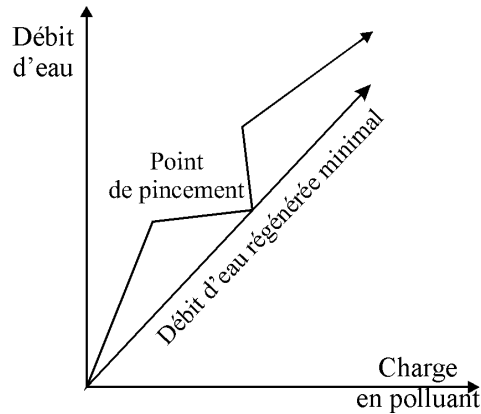


Figure I-7. Diagramme du pincement hydraulique (Wang et Smith, 1994).

Depuis l'étude de Wang et Smith (1994), de nombreux développements dans la conception des réseaux de recyclage et de régénération à l'aide de méthodes graphiques ont été réalisés. Ces derniers démontrent que pour une certaine concentration post-régénération, la concentration optimale de régénération est identique à la concentration du pincement du système. En 1996, Dhole et al. présentent une méthode graphique alternative permettant d'éliminer les limitations que présentaient la publication originale (pertes d'eau, gains, etc...). Leur méthode divise le problème en deux régions distinctes : au-dessus et en dessous du point de pincement (figure I-8). Pour atteindre la valeur minimale cible, l'eau fraîche entrant dans le réseau ne doit pas se situer dans une région en dessous du pincement et les sources sur le pincement ne doivent pas être rejetées telles quelles.

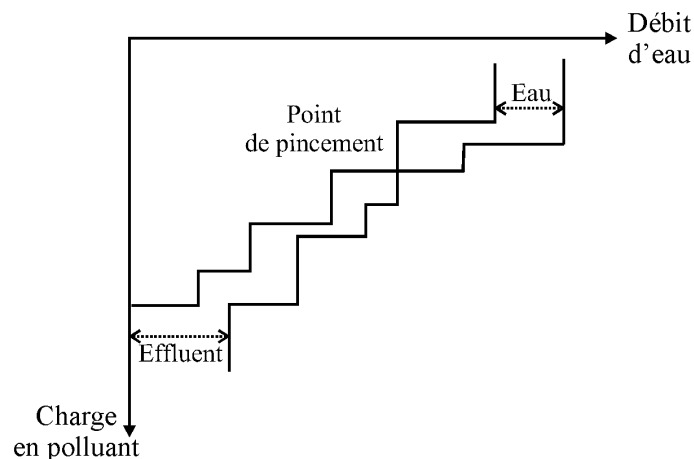


Figure I-8. Diagramme du pincement (Dhole et al., 1996).

Plus tard, Mann et Liu (1999) montrent que, dans certains cas, les deux concentrations (du point de pincement et en sortie de l'unité de régénération) ne sont pas totalement

identiques, et que la concentration du pincement du système est en dessous de celle de la régénération. Dunn et Wenzel (2001) ont effectué une étude en plusieurs volets portant sur les techniques de conception des réseaux d'eau dans le cadre de la synthèse des procédés. Dans une première étude qui traite plus particulièrement de la conception dans le cas où un seul polluant est présent, ils utilisent la technologie du pincement.

Jacob et al. (2002) automatisent cette méthode en créant un algorithme implémentant les propriétés citées ci-dessus à partir de données de base (débits, concentrations...). La principale limitation de cette technique est qu'il faille traiter chaque partie du procédé d'une même usine séparément car on ne peut tenir compte que d'un seul polluant à la fois. Au cours de la même année, Hallale (2002) crée une nouvelle méthode visant à atteindre le minimum d'eau fraîche et d'eau usée. Cette dernière est similaire à celle de Dhole et al. (1996) : pour obtenir les courbes composites des sources et des demandes, elle utilise la pureté de l'eau à la place des concentrations de polluants. La pureté est calculée comme étant le rapport entre les concentrations en polluants dans l'eau relativement à l'eau pure. Dans un cadre plus général, Savulescu et al. (2005a, b) ont étudié la possibilité de minimiser simultanément les consommations d'énergie et d'eau dans des réseaux avec une réutilisation maximale de l'eau. Ils utilisent des méthodes graphiques pour satisfaire les critères. Plus récemment, Feng et al. (2007), proposent une méthode graphique pour démontrer que la concentration optimale de régénération ne dépend pas de la concentration de pincement mais de l'allure des courbes composites. Une étude similaire a été réalisée par Jidong et al. (2008) au sein d'une industrie papetière réelle. Leur cas comporte sept unités de procédé, un seul contaminant ainsi qu'une unité de régénération. Leur analyse réduit la consommation d'eau de 90 m<sup>3</sup> à 2 m<sup>3</sup> par tonne de papier produit pour l'usine considérée.

### ***3.2 Autres techniques***

Des approches complémentaires à celle du pincement hydraulique sont exposées dans divers travaux basés sur les méthodes sources/demandes (Kuo et Smith, 1998, Feng et Seider, 2001, El-Halwagi, 1997 ; El-Halwagi et al., 2003; Kazantzi et el-Halwagi, 2005; Prakash et Shenoy, 2005; Bandyopadhyay, 2006; Manan et al., 2006; Tan et al., 2007). Récemment, Manan et al. (2006) publient une méthode basée sur celle du pincement. Ils proposent de coupler cette dernière avec un algorithme stochastique et appliquent la méthodologie sur l'étude d'une industrie papetière Malaisienne (Wan Alwi, 2007, Manan et al., 2006).

### **3.3 Conclusion**

Les techniques graphiques peuvent s'avérer d'une grande utilité dans des cas simples avec des systèmes à un seul polluant, elles ne sont pas encore adaptées pour la conception de réseaux d'eau dans des industries, telle que les industries pétrochimiques ou les raffineries où de nombreux polluants sont mis en jeu : sels divers et variés, hydrocarbures, et solides en suspension. Par ailleurs, elles sont limitées au cas monocritère de la minimisation de la consommation d'eau fraîche pour un réseau considéré. Elles sont inadaptées au traitement de problèmes multicritères, qui sont actuellement récurrents en ingénierie et en particulier dans le domaine de la conception de réseaux d'eau industrielle. Enfin, ces méthodes sont essentiellement basées sur les concepts « sources/demandes » ; ainsi les courants ne peuvent pas circuler de façon des demandes vers les sources. Ceci est pourtant souvent le cas lorsque par exemple une unité de procédé redistribue son eau usée vers une autre unité ; cette méthode limite ainsi l'espace des solutions obtenu. Pour ces raisons, elles n'ont pas été retenues dans la présente étude.

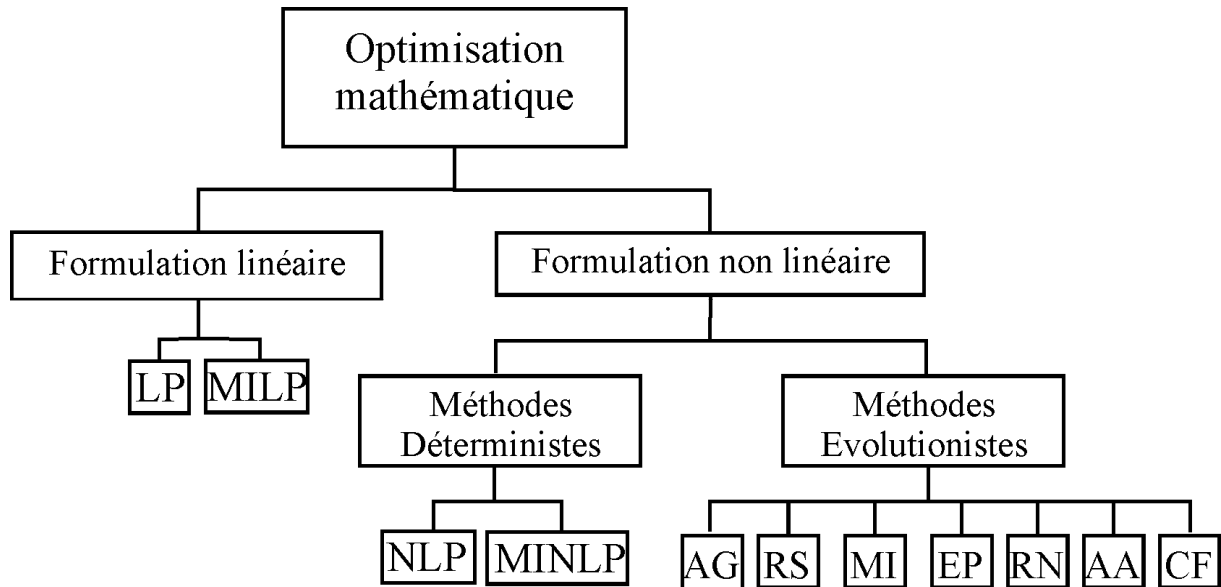
## **4. Méthodes d'optimisation mathématique pour l'intégration des procédés**

### **4.1 Méthodes d'optimisation**

Il existe de nombreuses méthodes d'optimisation, celles étant les plus couramment utilisées sont regroupées dans la figure I-9. On distingue deux grandes classes de méthodes. D'une part, la programmation linéaire qui est utilisée pour obtenir une solution optimale à des problèmes parfaitement décrits et représentés par un ensemble d'équations linéaires. Selon que le problème comporte des variables entières ou non, on distingue ainsi les MILP (Mixed Integer Linear Programming) des LP (Linear Programming). D'autre part, la programmation non linéaire sert à résoudre des problèmes décrits par des équations non linéaires. Elle regroupe deux grandes familles de méthodes : les procédures déterministes et les algorithmes stochastiques.

L'intégration des procédés consiste en une approche systémique utilisée pour lier les différentes unités d'un procédé et les divers équipements dans le but d'obtenir de meilleures solutions pour la conception et la fonctionnalité du réseau d'eau étudié. Depuis une quinzaine d'années, de nombreuses contributions optent pour une des méthodes exposées ci-dessus pour

optimiser les réseaux d'eau industriels. Une revue des techniques utilisées est illustrée dans la figure I-10, où les réseaux monopolluants sont séparés des réseaux multipolluants car leurs méthodes de résolution diffèrent.



**Figure I-9. Classification des principales méthodes d'optimisation**  
(Garcia et al., 2005).

Cette figure met en évidence plusieurs tendances :

- Les réseaux d'eau ne contenant qu'un seul polluant ont été très largement étudiés à l'aide de techniques graphiques incluant notamment la technique du pincement. Toutefois, des approches de programmation mathématique sont également utilisées pour étudier ce type de réseau avec une prédominance des formulations non linéaires.

- L'étude des réseaux multipolluants est menée par deux principales approches : la programmation mathématique non linéaire et les algorithmes génétiques.

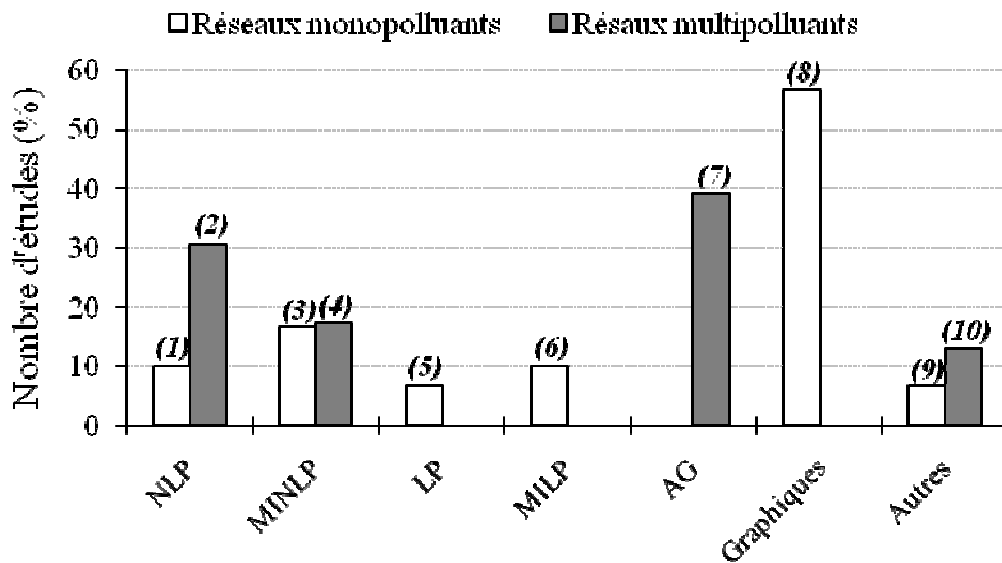


Figure I-10. Revue des études concernant l'optimisation des réseaux d'eau industriels monopolluants et multipolluants.

- (1) : Rossiter et Ravi, 1995 ; Dunn et al., 2001 ; Feng et al., 2008.  
 (2) : Takama et al., 1980 ; Bagajewicz et al., 2000 ; Dunn et al., 2001 ; Savelski et Bagajewicz, 2003 ; Feng et al., 2008 ; de Faria et al., 2009 ; Teles et al., 2009 ; Ahmetovic et Grossmann, 2010.  
 (3) : Quesada et Grossmann, 1995 ; Huang et al., 1999 ; Gunaratnam et al., 2005 ; Karuppiah et Grossmann, 2006 ; Feng et al., 2008.  
 (4) : Galan et Grossmann, 1998 ; Yang et al., 2000 ; Savelski et Bagajewicz, 2003 ; Feng et al., 2008 ; de Faria et al., 2009 ; Boix et al., 2011.  
 (5) : Savelski et Bagajewicz, 2000 ; Bagajewicz et Savelski, 2001.  
 (6) : Koppol et al., 2004 ; Poplewski et al., 2010 ; cette étude.  
 (7) : Tsai et Chang, 2001 ; Coello-Coello et al., 2002 ; Zheng et al., 2003, 2006 ; Poplewski, 2004 ; Prakotpol et Srinophakun, 2004 ; Shafiei et al., 2004 ; Keedwell et Khu, 2005 ; Lavric et al., 2005 ; Cao et al., 2007 ; Tudor et Lavric, 2010.  
 (8) : Wang et Smith, 1994, 1995 ; Dhole et al., 1996 ; El-Halwagi, 1997 ; El-Halwagi et al., 2003 ; Olesen et Polley, 1996 ; Kuo et Smith, 1998 ; Mann et Liu, 1999 ; Dunn et Wenzel, 2001 ; Feng et Seider, 2001 ; Jacob et al., 2002 ; Hallale, 2002 ; Kazantzi et el-Halwagi, 2005 ; Prakash et Shenoy, 2005 ; Bandyopadhyay, 2006 ; Manan et al., 2006 ; Wan Alwi, 2007 ; Gomes et al., 2007 ; Tan et al., 2007 ; Jidong et al., 2008.  
 (9) : Manan et al., 2006 ; Wan Alwi et al., 2008.  
 (10) : Alva-Argaez et al., 2006 ; Statyukha et al., 2008 ; Poplewski et al., 2011.

#### 4.2 Les méthodes stochastiques

Ces méthodes sont particulièrement adaptées à des problèmes de type « boîte noire » où aucune propriété mathématique du problème n'est connue ; il suffit de savoir évaluer les critères et les contraintes pour un jeu donné de valeurs des variables indépendantes. Malgré



leur facilité de mise en œuvre et leur capacité à s'extraire des optima locaux en autorisant certaines dégradations des critères, leurs conditions de convergence ne sont pas clairement établies. Ces méthodes consistent à faire évoluer une ou plusieurs solutions initiales à l'aide de règles probabilistes mimant souvent un processus naturel. Par exemple, on peut citer les algorithmes génétiques (Holland, 1975 ; Chafekar et al., 2005 ; Jezowski et al., 2007), le recuit simulé (Kirkpatrick, 1983), les systèmes immunitaires artificiels (Farmer et al., 1986), les colonies de fourmis (Dorigo, 1992 ; Maier et al., 2003), les essaims de particules (Kennedy et Eberhart, 1995), les abeilles artificielles (Nakrani et Tovey, 2004) et les réseaux de neurones (Ang et al., 2007). Toutefois, en présence de contraintes égalité difficiles à satisfaire de par les ordres de grandeur très disparates des termes impliqués (ici la tonne et le gramme), ces méthodes doivent faire appel à un solveur externe à chaque mouvement sur les variables, ce qui peut pénaliser énormément leur temps de calcul. Elles n'ont donc pas été retenues dans cette étude.

#### ***4.3 Les méthodes déterministes***

Ces méthodes requièrent la connaissance de certaines propriétés mathématiques du problème telles que la convexité ou la dérivabilité des critères et leurs conditions de convergence sont théoriquement établies. De la même manière que pour la programmation linéaire, elles peuvent soit être de type MINLP (Mixed Integer Non Linear Programming) si elles incluent des variables entières ou NLP (Non Linear Programming) dans le cas inverse. Avant de procéder au choix d'une procédure d'optimisation déterministe, il est nécessaire d'analyser la modélisation du problème de conception de réseaux d'eau industrielle.

### **5. Modélisation des réseaux d'eau industriels**

L'utilisation de programmes mathématiques pour la conception et l'intégration de procédés, consiste en trois étapes majeures (Grossmann et al., 2000) :

- La représentation de toutes les possibilités parmi lesquelles la solution optimale est extraite par définition d'une superstructure.
- La formulation d'un modèle mathématique incluant généralement des variables discrètes et continues. Les principaux composants d'un modèle sont : a) les critères à

optimiser qui s'expriment sous forme d'une fonction mathématique et b) les contraintes qui peuvent être soit de type égalité, soit inégalité.

- La résolution du modèle mathématique afin de déterminer une ou plusieurs solutions optimales.

### 5.1 Concept de superstructure

Une superstructure est définie comme l'ensemble de toutes les connexions possibles pour un réseau. Les questions posées sont alors: a) A partir d'un ensemble de possibilités devant être analysées, quels sont les principaux types de représentation pouvant être utilisés et quelles sont leurs implications sur la modélisation mathématique ? b) Pour une représentation donnée et sélectionnée, quelles sont les différentes propriétés garantissant que l'optimum global peut être atteint ?

Pour le problème considéré ici, les différents éléments entrant dans la représentation d'une superstructure pour un réseau d'eau sont les suivants:

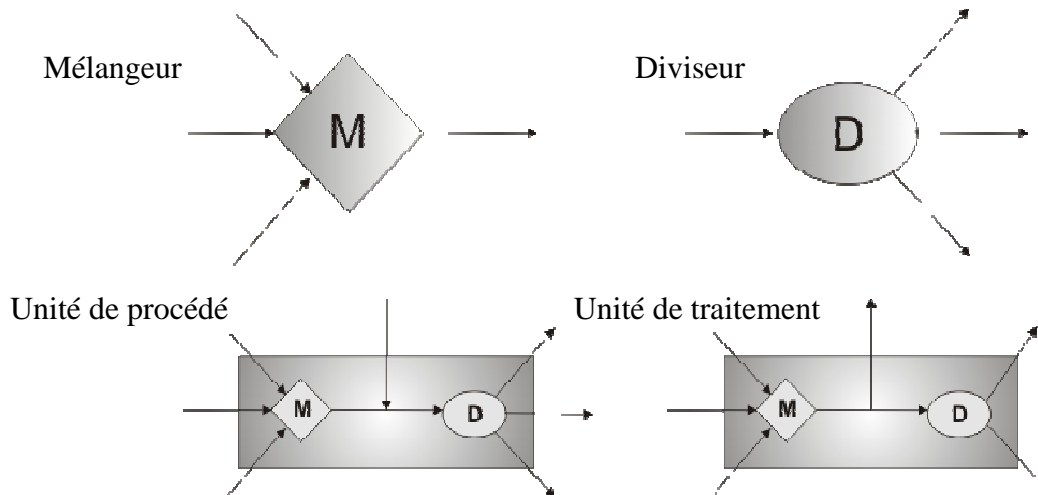


Figure I-11. Eléments composant une superstructure de réseau d'eau

### 5.2 Optimisation monocritère

La formulation monocritère est la plus ancienne pour les problèmes d'optimisation, elle s'écrit (Bierlaire, 2006) :

$$\begin{array}{l} \text{Min } f(x) \\ \left| \text{ Avec } g(x) \leq 0 \right. \\ \left| \text{ Et } h(x) = 0 \right. \end{array}$$

Où  $f$  est une fonction de  $R^n \times [0,1]^n$  dans  $R$ ,  $g(x) \in \mathbb{R}^m$ ,  $h(x) \in \mathbb{R}^p$ .

Ici,  $f(x)$  est la fonction objectif, les vecteurs  $g(x)$  et  $h(x)$  représentent respectivement  $m$  contraintes d'inégalité et  $p$  contraintes d'égalité. Cet ensemble de contraintes délimite un espace restreint de recherche de la solution optimale. Les problèmes d'optimisation sont donc non linéaires ou linéaires en fonction du type d'équations qui les composent et continus ou discrets selon le type de variables. D'où la distinction réalisée dans la figure I-10 entre LP/MILP et NLP/MINLP.

### 5.2.1 Programmation linéaire (LP/MILP)

Relativement peu de modèles de programmation linéaire sont publiés pour optimiser les réseaux d'eau monopolluants (Savelski et Bagajewicz, 2000 ; Bagajewicz et Savelski, 2001 ; Koppol et al., 2004, Poplewski et al., 2010). Bagajewicz et Savelski (2001) proposent une contribution importante dans le sens où les conditions d'optimalité dans le cas d'un réseau monopolluant sont précisément décrites. A travers des simplifications concernant les concentrations en polluant en sortie de chaque unité de procédé, le problème est linéarisé sous certaines conditions. A l'issue de cette étude et malgré sa facilité d'application et de résolution, seules deux études reprennent cette formulation (Koppol et al., 2004, Poplewski et al., 2010). Dans ce modèle, les variables sont les débits totaux d'eau et de polluants circulant dans le réseau, et c'est au niveau des équations que la concentration en sortie de chacun des procédés est fixée à son maximum autorisé. Pour ces études, l'objectif minimisé est la consommation d'eau fraîche ou le coût global du réseau, demeurant ainsi dans le cadre de l'optimisation monocritère.

Les avantages de ce type de méthode sont multiples : a) Des temps de résolution infimes (de l'ordre de la seconde) comparés à ceux des autres méthodes, b) Une convergence rapide et quasiment automatique vers un optimum global, c) La phase d'initialisation n'est pas nécessaire comme dans le cas des modèles non linéaires.

### 5.2.2 Etudes antérieures basées sur la programmation mathématique non linéaire

Le problème d'allocation des réseaux d'eau est généralement formulé à l'aide d'un programme non linéaire (NLP) ou d'un programme non linéaire à variables mixtes (MINLP) dans le cas où il prend en compte le nombre de connexions dans le réseau (cf. Figure I-10 pour les références). En effet, dans sa formulation mathématique, il contient des contraintes non linéaires comportant des termes bilinéaires dus aux produits des débits par les concentrations en polluant (Jezowski, 2008).

Le modèle proposé par Rossiter et Ravi (1995) de type NLP est appliqué à une raffinerie. Les auteurs minimisent un seul objectif : la consommation d'eau fraîche entrant dans le réseau. Quesada et Grossman (1995) et plus tard Galan et Grossman (1998) et Huang et al. (1999) introduisent une stratégie de type MINLP. Le principal problème mis en évidence dans ces études est le temps de calcul trop important notamment si la complexité du problème augmente à cause du nombre de procédés ou de polluants. Yang et al. (2000) optent également pour une programmation mathématique de type non linéaire afin de concevoir un réseau avec unité de régénération impliquant plusieurs polluants. Les auteurs se focalisent alors sur l'optimisation du réseau annexe de réutilisation des eaux blanches dans le cas de l'industrie papetière. Ils aboutissent à la conception d'un réseau optimal mais toujours avec une optimisation monocritère (minimisation de la consommation d'eau fraîche).

Dans la deuxième partie d'une publication de 2001, Dunn et al. (2001) utilisent le logiciel LINGO pour résoudre le problème. L'étude concerne un réseau d'eau au sein d'une industrie contenant plusieurs contaminants et un réseau de régénération des eaux usées. De façon analogue à la résolution effectuée dans la première partie de leur étude pour un seul polluant (Dunn et Wenzel, 2001), le problème est non linéaire. La fonction-objectif choisie est la minimisation des rejets d'effluents, il s'agit donc également d'une optimisation monocritère d'un réseau d'eau ayant permis de placer des unités de régénération de façon optimale dans le réseau.

Gunaratnam et al. (2005) utilisent une stratégie relativement complexe pour résoudre le problème incluant plusieurs polluants. La méthode exposée consiste à résoudre le problème sous forme linéaire en se plaçant aux concentrations maximales autorisées. Les valeurs

obtenues lors de cette première étape servent alors comme valeurs d'initialisation au MINLP. Ils implémentent cette procédure à l'aide du logiciel GAMS (General Algebraic Modelling System).

En 2006, Karuppiah et Grossmann travaillent sur l'algorithmique de la résolution du modèle MINLP. En effet, la non-convexité du problème engendre des difficultés de convergence lors de la résolution ; de plus, la solution retournée peut être un optimum local et non global. Ainsi, dans cette étude, un algorithme de type « branch-and-cut » est couplé à un algorithme de type « branch-and-bound » pour accélérer la convergence de ce dernier.

Plus récemment, une quantité relativement importante de travaux apparaît ; celle-ci concerne l'optimisation des réseaux d'eau multipolluants selon plusieurs objectifs sur différents exemples (Savelski et Bagajewicz, 2003 ; Isafiade et Fraser, 2008 ; Feng et al., 2008 ; de Faria et al., 2009 ; Teles et al., 2009 ; Ahmetovic et Grossmann, 2010). Dans ces travaux, la même méthodologie est appliquée : elle consiste à résoudre le problème d'optimisation à l'aide de solveurs globaux tels que CONOPT (Ahmetovic et Grossmann, 2010), BARON (Teles et al., 2009) ou LINGO (Feng et al., 2008) le plus souvent à l'aide de la bibliothèque GAMS. En prenant en compte les importances relatives de différents critères, une optimisation séquentielle monocritère est mise en œuvre pour résoudre ces problèmes multiobjectifs. La consommation d'eau fraîche, le débit d'eau régénérée, le coût global du réseau ou la charge en polluant jetée à l'égout sont minimisés, ce qui correspond à différents modèles mathématiques, ou fonction-objectifs. En résolvant ces modèles pas par pas, un réseau efficace de recyclage et de régénération des eaux peut être construit. Contrairement à la méthode Weighted-Sum, où une somme pondérée des critères est optimisée, et qui relève des méthodes d'optimisation multicritère par scalarisation, le facteur de pondération est affecté à chacune des fonctions après leur optimisation individuelle. Cette procédure est donc en fait une séquence d'optimisations monocritères.

Finalement, une résolution à l'aide d'une procédure de type NLP/MINLP présente certains inconvénients tels qu'une difficulté lors de la phase d'initialisation du problème (Karuppiah et Grossmann, 2006), ainsi qu'une convergence vers une solution optimale au sens global souvent difficile à obtenir. En effet, de nombreux solveurs retournent uniquement une solution locale si la fonction est de type non-convexe (Jezowski, 2008).

Malgré ces inconvénients, les études antérieures montrent des résultats intéressants concernant la minimisation d'eau fraîche. Dans les études précédemment évoquées, des gains significatifs sont obtenus puisque le réseau optimal atteint le minimum d'eau fraîche possible (Bagajewicz et al., 2002; Feng et al., 2008 ; Ahmetovic et Grossmann, 2010). De plus, un des principaux avantages de cette méthode est d'être polyvalente puisqu'elle résout aussi bien les réseaux monopolluants que multipolluants. Enfin, il est important de noter le manque de travaux étudiant le problème selon plusieurs objectifs simultanés malgré son importance dans le contexte environnemental actuel.

### 5.2.3 *Autres modèles mathématiques*

Des approches mathématiques complémentaires ont également été mises en œuvre pour pallier les inconvénients précédemment évoqués. La première étude concernant les réseaux d'eau date de 1980 (Takama et al., 1980), dans laquelle les auteurs proposent un modèle analogue aux modèles de transport utilisés dans les réseaux d'acheminement des matières premières, comme le gaz naturel par exemple (Han et al., 2004). Pour formuler le modèle, les auteurs assimilent le polluant comme une entité pouvant être transportée des sources (courants sortant des unités riches en polluant) vers des demandes (courants d'eau pauvres en polluants). La solution de ce problème consiste donc à déterminer le débit d'eau minimum associé aux courants pauvres de façon à pouvoir transférer tout le polluant des sources vers les demandes.

Suh et Lee (2002) proposent une méthode basée sur le paramètre d'incertitude fournissant des résultats robustes vis-à-vis d'aspects économiques et techniques. Le paramètre d'incertitude est représenté par différents scénarii et la probabilité qui leur est associée. Ce problème de conception peut alors être formulé sous forme de plusieurs problèmes NLP multi-scénarii minimisant le coût (NPC – Net Present Cost). Plus récemment, Feng et Chu (2004) décomposent le réseau en plusieurs sous-systèmes : un réseau contenant les unités de procédés, un second incluant uniquement des unités de régénération et enfin une unité traitant l'eau avant de la rejeter à l'égout. C'est ensuite trois NLP qui sont résolus de façon séquentielle.

### 5.3 Optimisation multicritère

La présente étude est effectuée dans un cadre multicritère où plusieurs objectifs antagonistes doivent être optimisés simultanément. On peut envisager par exemple un critère économique, un critère lié à la consommation d'eau fraîche, un autre relatif à l'eau régénérée, et un critère traduisant la complexité du réseau à travers le nombre de connexions. La formulation générale d'un problème d'optimisation multicritère s'écrit :

$$\begin{array}{l} \text{Min } [f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)] \\ \left| \begin{array}{l} \text{Avec } \mathbf{g}(x) \leq \mathbf{0} \\ \text{Et } \mathbf{h}(x) = \mathbf{0} \end{array} \right. \end{array}$$

où  $f_i$  ( $i = 1, k$ ) est une fonction de  $R^n \times [0, 1]^{n^2}$  dans  $R$ ,  $\mathbf{g}(x) \in \mathbb{R}^m$ ,  $\mathbf{h}(x) \in \mathbb{R}^p$ .

De façon générale, ce type de problème possède un ensemble de solutions non dominées représentées graphiquement par un front de Pareto. Un tel front est en fait une courbe d'équilibre telle que l'on ne puisse pas améliorer l'un des critères sans en dégrader au moins un autre.

Seules quelques études proposent une optimisation multicritère (Vamvakeridou-Lyroudia et al., 2005 ; Farmani et al., 2006 ; Mariano-Romero et al., 2007; Tanyimboh et al., 2010). Les deux études de 2005 et 2007 portent sur l'optimisation de réseaux exclusivement monopolluants selon deux objectifs : la consommation d'eau fraîche et le coût d'investissement du réseau, dans leur cas un réseau de distribution. Les auteurs couplent les principes de l'analyse du pincement avec une programmation mathématique pour obtenir des solutions mais aucune aide à la décision n'est proposée finalement. Farmani et al. (2006) et Tanyimboh et al. (2010) explorent l'optimisation multiobjectif via les algorithmes génétiques avec, pour domaine d'application, les réseaux de distribution d'eau.

Malgré leur utilité dans ce domaine, relativement peu d'études présentent une réelle vision d'un ensemble de solutions optimales ainsi que des procédures d'aide à la décision permettant de sélectionner une ou plusieurs « bonnes » solutions sur le front de Pareto. Cette rareté de travaux concernant l'optimisation multicritère des réseaux d'eau industrielle a constitué la motivation majeure de la présente étude.

## 6. Stratégies utilisées et plan de l'étude

### 6.1 Choix de la procédure d'optimisation multicritère

Rappelons que les méthodes stochastiques, en particulier les algorithmes génétiques très fréquemment mis en œuvre dans la cadre de l'optimisation multiobjectif, n'ont pas été retenues, par suite de la présence de contraintes égalité mal conditionnées. En effet, les équation de bilans nécessitent d'être résolues avec une tolérance inférieure à  $10^{-15}$ , en d'autres termes elles doivent être vérifiées « exactement » ; si cette condition n'est pas remplie, le problème ne peut pas être résolu (Boix et al., 2011).

Dans ce travail, nous avons choisi de résoudre le problème de conception de réseaux d'eau à l'aide d'une programmation mathématique déterministe. Celle-ci nécessite l'utilisation d'une procédure NLP (nonlinear programming) ou MINLP (mixed integer non linear programming) dans le cas où le nombre de connexions doit être comptabilisé car il requiert l'introduction de variables binaires. L'espace multidimensionnel  $R^{n1} \times [0,1]^{n2}$  dans lequel se situe l'étude n'étant pas pourvu d'une relation d'ordre total, l'utilisation de méthodes déterministes dans un cadre multicritère est effectuée par le biais des méthodes de scalarisation, où le problème multiobjectif est transformé en un problème monoobjectif admettant les mêmes solutions.

Miettinen (1999) effectue une revue de différentes techniques et Engau and Wiecek (2005) présentent sept types de méthodes de scalarisation, mais les deux plus populaires sont la méthode des sommes pondérées (Weighted Sum - WS) et  $\epsilon$ -contrainte ( $\epsilon$ -C). La procédure WS est fondée sur une fonction de recouvrement, somme convexe pondérée des divers critères, qui contient les contributions de chacune des fonctions objectif. Les facteurs de pondération sont attribués a priori, puis modifiés pour obtenir le front de Pareto, c'est-à-dire l'ensemble des solutions non dominées (ou solutions satisfaisantes). Le problème majeur de cette méthode est la variation des facteurs de pondération qui conduit souvent à des fronts de Pareto comportant une faible densité de solutions (thèse en cours de G. Hernandez-Rodriguez, 2011). Dans la méthode  $\epsilon$ -C, qui a été retenue dans cette étude, un seul critère est optimisé alors que les autres sont introduits en tant que contraintes bornées supérieurement. En faisant varier les valeurs numériques des bornes supérieures, on peut obtenir un front de Pareto. Toutefois la difficulté majeure de cette méthode réside dans la détermination des Nadir points



(points où les critères prennent leurs plus mauvaises valeurs). Les travaux récents de Mavrotas (2009) ont apporté un éclairage nouveau sur ce problème, et c'est pourquoi la méthode  $\epsilon$ -C a été choisie pour traiter le problème multicritère; elle est décrite dans le chapitre suivant.

Enfin, se pose la question du choix d'une ou plusieurs « bonnes » solutions sur le front de Pareto. A cet effet, un nouvel indicateur économique est mis en place dans le chapitre suivant : le coût équivalent global (CEG) mesuré en débits d'eau équivalents. Ce nouvel outil permet d'exprimer le coût total d'un réseau en termes de quantité d'eau fraîche et non en unité monétaire (Boix et al., 2011).

## ***6.2 Choix de l'algorithme et du logiciel***

De nombreux progrès ont été réalisés dans les années 1950 et 1960 avec le développement d'algorithmes et de codages informatiques pour résoudre des problèmes d'optimisation de tailles relativement importantes. Toutefois, dans les années 1970, le nombre d'applications de ces outils a été plus faible que ce qui était attendu en raison de la difficulté à modéliser les problèmes. En effet, dans un processus d'optimisation, la majeure partie du temps de travail est consacrée au développement du modèle, à sa transformation, ainsi qu'à sa préparation en vue de l'optimiser. Chaque modèle demandait ainsi de nombreuses heures de travail afin d'écrire le programme qui transformerait les données dans une forme acceptée par les logiciels optimiseurs. Il était alors difficile de détecter et d'éliminer des erreurs car les programmes étaient uniquement accessibles aux spécialistes qui avaient écrit les codes d'optimisation et non aux analystes qui étaient en charge du projet.

De nos jours, la plupart des logiciels d'optimisation sont accessibles sans entrer dans le codage de l'algorithme d'optimisation. Ceci est particulièrement vrai pour le logiciel GAMS, qui offre une grande variété de procédures d'optimisation et qui permet une description du modèle indépendante des solutions algorithmiques. De plus, des modèles complexes peuvent s'écrire de façon compacte et des changements dans le programme sont relativement simples à réaliser. En fait, le logiciel possède une interface d'entrée avec un langage particulier qui possède toutes les fonctionnalités d'un langage de programmation dédié. Enfin, l'écriture du modèle est générique et l'on peut aisément changer le solveur selon

la nature du problème (linéaire, non linéaire, continu, mixte) sans avoir à modifier sa formulation. Toutes ces raisons ont conduit à retenir le logiciel GAMS.

Les formulations linéaires, de résolution facile car la convergence est en général immédiate, sont optimisées grâce au solveur CPLEX 9.1 utilisant l'algorithme du simplexe. Concernant les formulations de type non linéaires, d'une façon générale, certains solveurs de GAMS n'arrivent pas à obtenir des solutions NLP à cause de termes bilinéaires (non convexes) intervenant dans les contraintes. C'est pour cette raison que les optimiseurs globaux et robustes COIN-BONMIN 0.9 (Computational Infrastructure - Basic Open-source Nonlinear Mixed Integer Programming, avec la bibliothèque Bonmin 0.99 qui utilise MUMPS 4.7.3) (Bonami et al., 2006) et COIN-COUCENNE 0.3 (Convex Over and Under ENvelopes for Nonlinear Estimation) sont choisis pour résoudre les problèmes de type NLP et MINLP.

Le premier utilise différents algorithmes exacts pour optimiser des problèmes dont les fonctions sont convexes et heuristiques lorsqu'elles sont non-convexes (Bonami et al., 2008). Les algorithmes sont : un algorithme par séparation et évaluation progressive (Branch and Bound), des méthodes à chemin irréalizable, des algorithmes Branch-and-cut ainsi que des approches combinant tous ces algorithmes simultanément. Le solveur COIN-COUCENNE est spécialisé dans la résolution de problèmes non-convexes. Il implémente une linéarisation au sein d'une procédure par séparation et évaluation progressive.

## **7. Plan de l'étude**

Les pressions économiques et environnementales actuelles impliquent d'obtenir des réseaux d'eau industrielle optimisés selon des critères antagonistes. Dans ce premier chapitre, en s'appuyant sur une analyse bibliographique, les choix primordiaux concernant cette étude ont été effectués (programmation mathématique déterministe, méthode  $\varepsilon$ -C, logiciel GAMS).

Dans le deuxième chapitre, la formulation du problème est exposée dans son cadre le plus général et adaptée ensuite aux réseaux n'impliquant qu'un seul polluant. Des réseaux provenant d'exemples de la littérature sont étudiés afin de valider la méthode. Enfin une

procédure d'aide à la décision basée sur un nouvel indicateur économique est proposée pour obtenir un « bon » compromis parmi les fronts de Pareto.

Le troisième chapitre a pour but l'étude des réseaux multipolluants qui sont les plus courants dans l'industrie des procédés. Bien que leur résolution soit plus complexe, l'étude multiobjectif présentée dans cette thèse offre l'avantage de proposer un ensemble de solutions parmi lesquelles un réseau optimal peut être sélectionné pour chacun des exemples traités.

L'étude réalisée pour les réseaux d'eau monopolluants est étendue à l'optimisation de réseaux d'eau et d'énergie dans le chapitre IV. Le travail consiste également à minimiser plusieurs objectifs avec, notamment, la consommation d'énergie. Une méthodologie originale est proposée de manière à résoudre facilement l'allocation des réseaux d'eau et de chaleur. Plusieurs exemples, incluant en particulier un cas réel d'une industrie de pâtes et papiers, sont étudiés.

Enfin, dans un cadre plus général, la méthodologie mise en œuvre est appliquée aux parcs éco-industriels, grand challenge de ces dernières années, tant au plan scientifique qu'au plan écologique, économique et sociétal. La procédure permettant d'aborder des problèmes très complexes, elle a pu être étendue au cas des éco-parcs, incluant un grand nombre de variables. Enfin, les parcs éco-industriels impliquant simultanément eau et énergie sont finalement abordés.

Une conclusion générale met en lumière les principaux acquis au cours de cette étude et dresse quelques perspectives concernant la poursuite de ce travail.



---

---

*CHAPITRE II – Etude des réseaux d'eau  
monopolluants*

---

---

## Nomenclature du chapitre

Les indices  $i=1$  et  $i>1$  sont respectivement attribués à l'eau et aux divers polluants.  
 $j$  et  $k$  représentent les unités de procédé et  $m$  et  $n$  les unités de régénération.

$Wp^{j \rightarrow k}$	débit massique total allant du procédé $j$ au procédé $k$ (T/h)
$Wr^{m \rightarrow n}$	débit massique total allant de l'unité de régénération $m$ à l'unité de régénération $n$ (T/h)
$Wrp^{m \rightarrow j}$	débit massique total allant de l'unité de régénération $m$ au procédé $j$ (T/h)
$Wpr^{j \rightarrow m}$	débit massique total allant du procédé $j$ à l'unité de régénération $m$ (T/h)
$Wd^j$	débit massique total allant du procédé $j$ à la décharge (T/h)
$Wrd^m$	débit massique total allant de l'unité de régénération $m$ à la décharge (T/h)
$W_I^j$	débit total d'eau fraîche entrant dans le procédé $j$ (T/h)
$Cp_{j,i}^e$	concentration du polluant $i$ en entrée du procédé $j$ (ppm)
$Cp_{j,i}^s$	concentration du polluant $i$ à la sortie du procédé $j$ (ppm)
$Cr_{m,i}^e$	concentration du polluant $i$ en entrée de l'unité de régénération $m$ (ppm)
$Cr_{m,i}^s$	concentration du polluant $i$ à la sortie de l'unité de régénération $m$ (ppm)
$Cd_i$	concentration du polluant $i$ à la décharge (ppm)
$yp_i^j$	variable binaire du courant d'eau fraîche arrivant au procédé $j$ , pour le polluant $i$
$yp_i^{j \rightarrow k}$	variable binaire du courant reliant le procédé $j$ au procédé $k$ , pour le polluant $i$
$yp_r^{j \rightarrow m}$	variable binaire du courant reliant le procédé $j$ à l'unité de régénération $m$ , $i$ donné
$yd_i^j$	variable binaire du courant reliant le procédé $j$ à la décharge, pour le polluant $i$
$yrp_i^{m \rightarrow j}$	variable binaire du courant reliant l'unité de régénération $m$ au procédé $j$ , pour $i$ donné
$yr_i^{m \rightarrow n}$	variable binaire du courant reliant l'unité de régénération $m$ à l'unité $n$ , pour $i$ donné
$Cmax_{j,i}^e$	concentration maximale du polluant $i$ à l'entrée du procédé $j$ (ppm)
$Cmax_{j,i}^s$	concentration maximale du polluant $i$ à la sortie du procédé $j$ (ppm)
$M_i^j$	charge en polluant $i$ générée par l'unité de procédé $j$ (g/h)
$Crmax_{m,i}^s$	concentration du polluant $i$ à la sortie de l'unité de régénération $m$ (ppm)
$R_i^m$	rendement de l'unité de régénération $m$ pour le polluant $i$ , ( $0 < R < 1$ )
$wp_i^{j \rightarrow k}$	débit massique du composé $i$ allant du procédé $j$ au procédé $k$ (T/h)
$wr_i^{m \rightarrow n}$	débit massique du composé $i$ allant de l'unité de régénération $m$ à l'unité $n$ (T/h)
$wrp_i^{m \rightarrow j}$	débit massique du composé $i$ allant de l'unité de régénération $m$ au procédé $j$ (T/h)

$wpr_i^{j \rightarrow m}$	débit massique du composé $i$ allant du procédé $j$ à l'unité de régénération $m$ (T/h)
$wd_i^j$	débit massique du composé $i$ allant du procédé $j$ à la décharge (T/h)
$wrd_i^m$	débit massique du composé $i$ allant de l'unité de régénération $m$ à la décharge (T/h)
$w_1^j$	débit d'eau fraîche entrant dans le procédé $j$ (T/h)
$wP_{j,i}^e$	débit massique du composé $i$ entrant dans le procédé $j$ (T/h)
$wP_{j,i}^s$	débit massique du composé $i$ sortant du procédé $j$ (T/h)
$wr_{m,i}^s$	débit massique du composé $i$ sortant de l'unité de régénération $m$ (T/h)
$U$	paramètre fixé à une grande valeur (c.a.d. supérieure à chaque débit massique)
$F_1$	fonction-objectif 1 : consommation totale d'eau fraîche (T/h)
$F_2$	fonction-objectif 2 : débit total d'eau régénérée (T/h)
$F_3$	fonction-objectif 3 : nombre total d'interconnexions dans le réseau
$F_D$	débit d'eau rejeté à la décharge (T/h)

## 1. Introduction et motivations

D'un point de vue conceptuel, la formulation d'un problème d'optimisation peut être définie comme une méthode visant à concevoir, à partir d'un ensemble de données et d'équipements disponibles, un modèle satisfaisant des objectifs, des contraintes et une topologie, tout en optimisant un ou plusieurs critères. Dans le cas des réseaux industriels d'eau, il s'agit de construire un modèle mathématique polyvalent qui puisse être adapté aux différents types de réseaux rencontrés dans le monde industriel.

Les étapes de construction et d'élaboration du modèle servant de base à l'optimisation sont illustrées sur la figure II-1:

- La phase de formulation et de définition constitue la première étape. Elle nécessite d'obtenir des informations sur le problème : cela peut provenir de l'industrie concernée, d'expériences réelles ou encore de cas théoriques. Dans cette étape, les objectifs doivent être clairement formulés. En fonction des données, les variables de décision ainsi que les principes physiques appliqués pour modéliser le réseau sont choisis.
- La deuxième étape consiste à choisir une méthode de résolution appropriée, appelée phase de conception. Selon la formulation préalablement effectuée, une méthode de résolution ainsi que l'outil nécessaire pour mener à bien cette résolution doivent être sélectionnés. Dans le cas présent, l'outil regroupe l'algorithme mathématique et le logiciel correspondant qui vont résoudre le problème.
- Enfin, une phase d'évaluation sur des cas simples permet la vérification du modèle construit. Si les solutions obtenues ne sont pas en accord avec la réalité, il pourra être nécessaire de revoir l'étape de formulation afin de s'assurer de la conformité du problème.

Une fois ces étapes réalisées, les optimisations de divers exemples peuvent être menées. Dans ce chapitre, ces différentes étapes sont exposées dans le but de proposer une méthode globale permettant d'optimiser les réseaux d'eau industriels les plus variés.



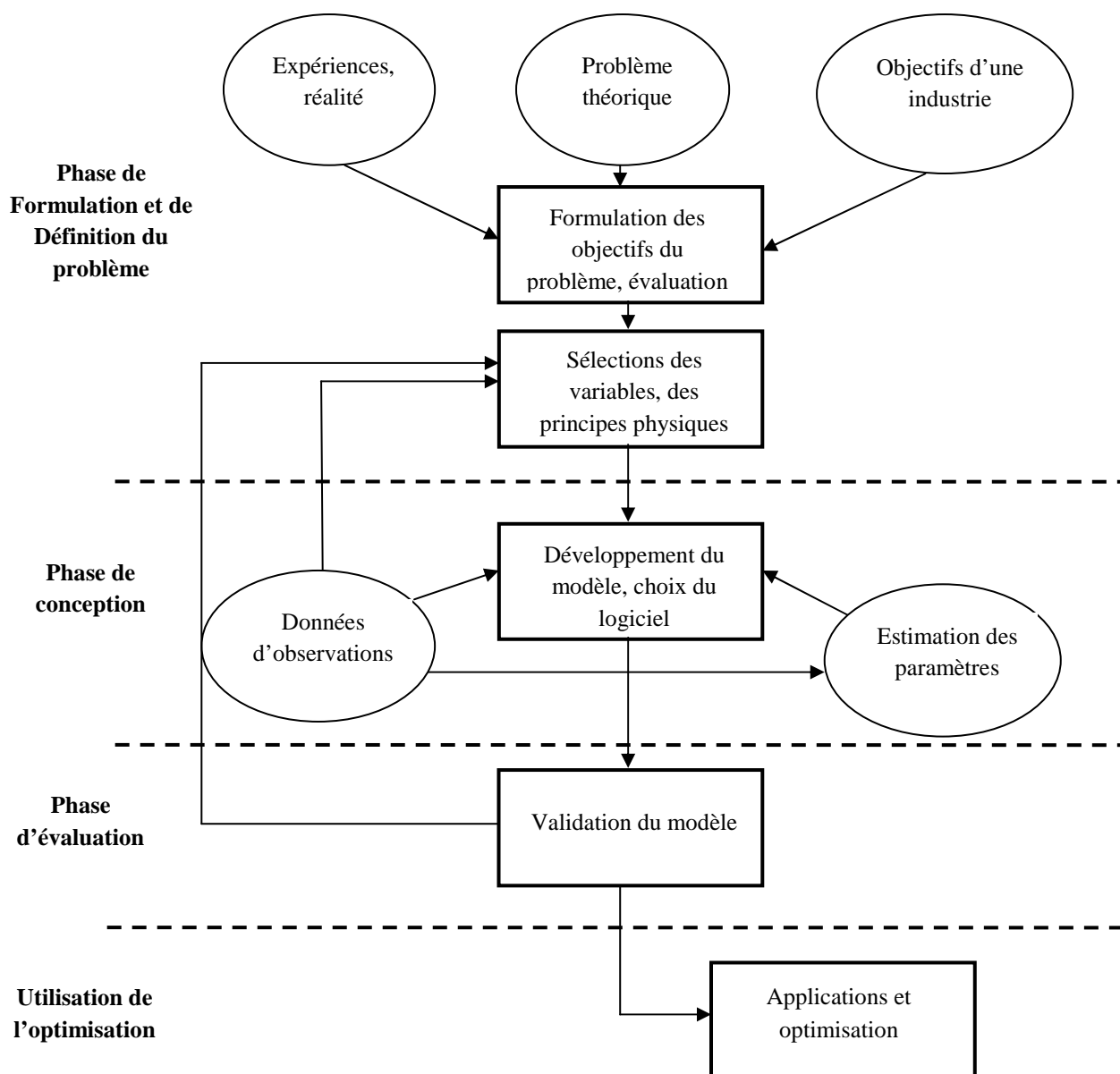


Figure II-1. Schéma de la procédure globale d'optimisation (Edgar et al., 2001).

La première partie repose sur une formulation du problème dans son cas le plus général. S'appuyant sur le concept de superstructure, elle reprend la modélisation effectuée dans la littérature pour la majorité des réseaux d'eau industriels. Cependant, puisque cette méthode possède certains inconvénients pour des problèmes bien particuliers, la deuxième partie propose une formulation propre aux réseaux d'eau monopolluants. Pour chacun des cas, des exemples de validation sont exposés afin de permettre une utilisation de ces méthodes dans les chapitres suivants.

## 2. Formulation générale (MINLP)

### 2.1 Superstructure

Une programmation mathématique est utilisée dans ces travaux afin de résoudre les problèmes d'allocation de réseaux d'eau. Dans la littérature, il est communément admis de définir une superstructure (Takama et al., 1980 ; Bagajewicz et al., 2002 ; Grossman, 2005 ; Feng et al., 2008). Cette étape requiert de répondre à deux principales questions :

- Lorsqu'un jeu d'alternatives possibles doit être analysé, quels sont les types de représentations disponibles pouvant être utilisées et surtout quelles en seront les implications sur la modélisation ?
- Pour une représentation sélectionnée, quelles sont les alternatives possibles pouvant être incluses et garantissant qu'un optimum global est bien obtenu ?

En partant d'un nombre d'unités utilisant de l'eau, on doit aboutir à un réseau constitué de courants (interconnexions) entre les différentes unités de façon à minimiser l'eau fraîche qui alimente le réseau et que les besoins en termes de qualité d'eau pour les différentes unités soient respectés. Ceci définit une superstructure qui prend en compte toutes les possibilités de courants telles que l'illustre la figure II-2.

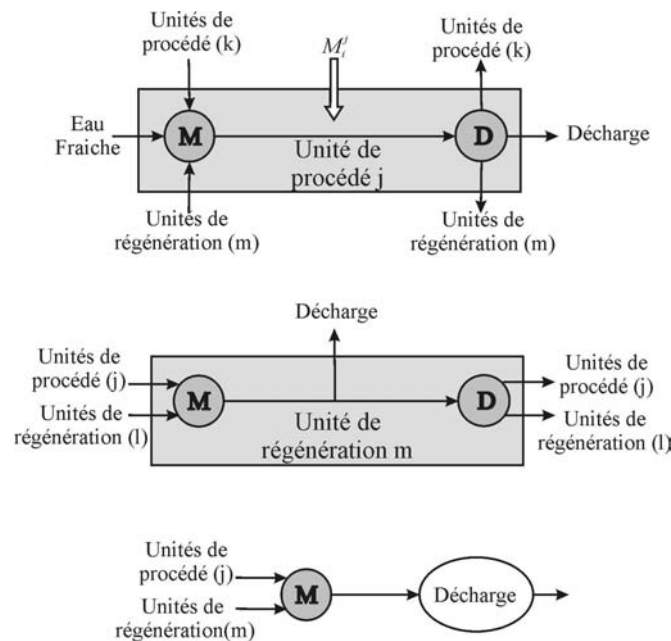


Figure II-2. Superstructure générale d'un réseau d'eau.

Chaque procédé requiert des concentrations d'entrée et de sortie maximales et de même, les unités de régénération ont une capacité de traitement fixée. L'eau fraîche entrant est définie comme l'eau n'ayant pas encore traversé le réseau, c'est donc une eau « pure » ou « vierge ». Pour chacun des procédés utilisant l'eau, les sources en eau peuvent être l'eau fraîche, l'eau utilisable provenant des autres procédés et/ou l'eau directement recyclée ; tandis qu'en sortant d'un procédé, l'eau peut aller directement à la décharge, aux autres procédés et/ou être envoyée dans les unités de traitement. Pour une unité de traitement donnée, l'eau entrant peut provenir des procédés et/ou des autres unités de traitement. Une certaine quantité d'eau peut être rejetée directement à la décharge avant traitement si elle a des concentrations en polluant peu importantes en fonction des valeurs fixées par le problème. Après avoir été traitée, l'eau est réutilisée dans les différents procédés et/ou envoyée dans les autres unités de régénération.

Le problème est abordé sous forme de boîtes noires par souci de généralisation des cas traités. On appelle réseau en « boîtes noires » une représentation où il est possible de travailler sans se préoccuper des rôles qu'ont chacun des procédés au sein du réseau afin de pouvoir adapter les programmes écrits au plus grand nombre de réseaux possibles. Même si le rôle exact de chacun des procédés n'est pas connu, ils doivent cependant être parfaitement définis. En effet, pour chacun d'entre eux, il est fondamental de connaître toutes les caractéristiques en termes de concentrations en polluants, de débits d'eau et/ou de température.

## ***2.2 Formulation***

La superstructure une fois établie, il est possible de définir le système dans sa globalité. Les questions qui se posent sont les suivantes : quels paramètres sont fixés dans le réseau ? Quelles sont les variables d'optimisation recherchées ? Quelles contraintes a-t-on sur la résolution ? Et enfin, quels objectifs doit-on satisfaire ?

### *2.2.1 Les variables*

Dans un problème d'optimisation, les variables, dites encore variables de décision, sont les composantes du système sur lesquelles il est possible d'agir afin d'améliorer son fonctionnement. C'est donc en faisant varier le vecteur  $x$  que l'on recherche l'optimum de la fonction objectif choisie dans le cas monocritère, et dans le cas multicritère on recherche le meilleur compromis possible entre les différents objectifs. Si ces variables sont au nombre de

n, elles sont représentées par un vecteur colonne appartenant à  $\mathbb{R}^n$ , qui s'écrit :  
 $x^T = (x_1, \dots, x_n)$ .

Dans la superstructure qui a été sélectionnée, comme le montre la figure 2, des courants circulent entre les différentes composantes du réseau d'eau. Chacun de ces courants est caractérisé par un débit d'eau et une certaine concentration en polluant(s), qu'il y en ait un seul ou plusieurs. En effet, on cherche à déterminer la valeur du débit d'eau et de la concentration en polluant de chaque courant du réseau de façon à optimiser le ou les différents objectifs. Il est aussi important de noter que tous les courants décrits sont des chemins faisables, mais qui n'existent pas forcément tous. Si, pour un courant donné, les variables sont toutes nulles, c'est que le courant n'existe pas. Dans la suite de l'étude, les variables sont notées selon la nomenclature donnée en début du chapitre. Nous rappelons que les débits d'eau seront toujours attribués à l'indice  $i=1$  et les polluants  $i>1$ .

Ainsi, dans un réseau donné, le nombre de variables dépend du nombre de procédés, d'unités de régénération et bien sûr de polluants. A titre d'exemple, un réseau très simple de deux procédés, un seul polluant et une seule unité de régénération en contient déjà 32. Retenons que ce nombre augmente très vite et atteint rapidement plusieurs centaines voir des milliers pour des systèmes ne contenant qu'un seul polluant.

En conclusion, les variables du système sont donc tous les courants caractérisés par un débit total massique en eau et en polluant(s). Ce sont toutes ces valeurs qui varient lors de la minimisation des objectifs et qui sont ainsi adaptés de façon optimale.

### 2.2.2 Les fonction-objectifs

Plusieurs objectifs peuvent être impliqués dans le cas des réseaux d'eau industriels. Concevoir des réseaux « propres » d'un point de vue environnemental constitue un des objectifs premiers. Cependant, afin de proposer des solutions applicables en pratique, il est souvent nécessaire de prendre en compte l'aspect économique de façon simultanée.

Dans un premier temps, le critère essentiel à optimiser, celui qui est le plus largement utilisé dans les travaux antérieurs, est la consommation d'eau fraîche. En effet, moins on consomme d'eau fraîche, moins on a de chance de polluer une grande quantité d'eau ; toute l'eau entrante est en général rejetée par la suite. Dans un souci environnemental, lorsque l'on

conçoit un réseau, il est important de veiller à ce que le débit d'eau fraîche consommé soit le plus faible possible, il constitue ainsi le premier critère choisi :

$$F_1 : \text{Min} \left( \sum_j W_1^j \right)$$

$F_1$  représente la somme des courants d'eau fraîche alimentant chacun des procédés  $j$ .

Lorsque la consommation d'eau fraîche dans un réseau est minimisée, il est logique que le débit d'eau à l'entrée des unités de régénération augmente. En effet, moins la source en eau fraîche est importante, plus l'eau usée devra être traitée pour alimenter les différents procédés. Par conséquent, c'est le second critère qui a été choisi pour l'étude,  $F_2$  :

$$F_2 : \text{Min} \left( \sum_m \left( \sum_n W_r^{n \rightarrow m} + \sum_j W_{pr}^{j \rightarrow m} \right) \right)$$

$F_2$  est la somme sur l'ensemble des unités de régénération  $m$  de la somme des courants venant des divers procédés et des autres unités de régénération. Ce paramètre est aussi relié au coût total de traitement des eaux usées. Plus le débit entrant dans les unités de traitement sera élevé, plus le coût sera élevé (Wright et Woods, 1993, 1994).

Enfin, le dernier critère  $F_3$  qui peut être utilisé concerne la topologie du réseau. Les solutions proposées doivent posséder un nombre limité de connexions. Si un réseau consomme le moins d'eau fraîche possible et a un coût de régénération des eaux très faible, il y a une forte probabilité pour qu'il soit très complexe. Si le nombre de connexions y est très important, même en minimisant le coût des unités de régénération, le coût d'investissement sera élevé. La configuration d'un réseau d'eau va influencer fortement son coût. Ainsi, le nombre d'interconnexions dans le procédé doit aussi être minimisé.

L'existence ou non d'un courant est caractérisée par des variables binaires : 0 si le courant n'existe pas, 1 s'il existe. Les variables binaires utilisées sont répertoriées dans la nomenclature en début de chapitre. D'où la définition du critère  $F_3$ , qui ne prend que des valeurs entières.

$$F_3 : \text{Min} \left( \sum_j \left( \sum_k y p_i^{j \rightarrow k} + \sum_m y p r_i^{j \rightarrow m} + y d_i^j \right) + \sum_m \left( \sum_j y r p_i^{m \rightarrow j} + \sum_k y r_i^{m \rightarrow k} \right) \right)$$

$F_3$  représente la somme des différentes connexions qui composent le réseau.

### 2.2.3 Les paramètres

Les paramètres sont les valeurs qui sont fixées par l'utilisateur. Ce sont des données qui peuvent varier d'un exemple de réseau à un autre. Elles sont représentées par une étoile sur la figure II-3. Ainsi, chaque procédé est défini par trois caractéristiques différentes : les concentrations maximales d'entrée et de sortie ainsi que la charge en polluant qu'il génère par son fonctionnement.

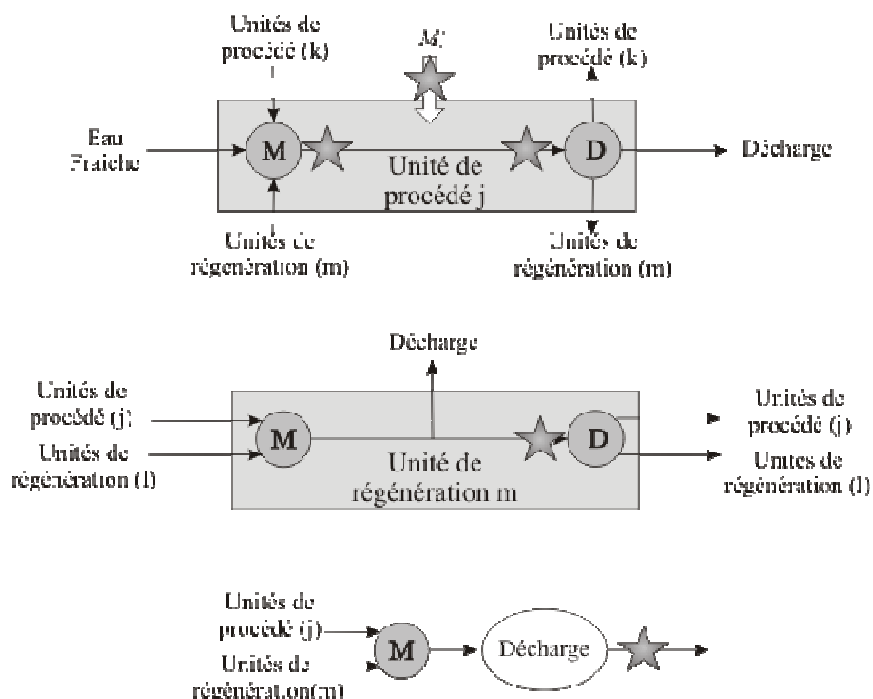


Figure II-3. Paramètres fixés par l'utilisateur (étoiles de la superstructure)

Ainsi, à l'entrée et à la sortie de chaque procédé, des fractions massiques exprimées en unités acceptables, ont une valeur définie par l'utilisateur. Ces paramètres sont introduits dans la formulation en tant que contraintes puisque ces valeurs représentent des bornes maximales.

Toute unité contamine l'eau à hauteur d'une certaine fraction massique en polluant, dépendant du débit entrant et de la masse de pollution entraînée. Par exemple dans le cas du procédé papetier, une des unités de procédé est la machine à papier. Lorsque l'eau est introduite dans ce procédé elle peut être vierge mais la fabrication de la feuille de papier va introduire dans l'eau une quantité importante de fibre de bois. La quantité de polluant  $i$  engendrée par un procédé  $j$  s'exprime en débit massique soit en g/h afin que les unités soient homogènes avec les T/h et les ppm ( $10^{-6}$ ).

Une unité de régénération peut être définie de plusieurs façons : soit elle possède un certain rendement, ou efficacité, en fonction du polluant qu'elle traite, soit elle traite les eaux usées qu'elle reçoit de façon à ce qu'elles ressortent de l'unité avec une fraction massique en polluant fixée. Lorsqu'un seul polluant circule au sein du réseau, ce sera cette dernière solution qui sera utilisée car elle est plus en accord avec la réalité. Tandis que lorsque plusieurs polluants sont mis en jeu, il est plus probable que chaque unité traite en particulier un seul des polluants. Ceci constitue donc un paramètre variable selon le problème posé.

Certains travaux antérieurs (Karrupiah et Grossmann, 2008) ont étudié l'influence de l'incertitude posée par certains de ces paramètres. En effet, la charge en polluant générée par chacune des unités de procédé peut ne pas être connue parfaitement par l'utilisateur. Ainsi, il peut être utile de considérer non pas une valeur définie mais une gamme de variation pour le paramètre dans laquelle une optimisation multi-scénarii est étudiée. Ce travail peut être réalisé en fonction des cas industriels étudiés et si le besoin est pour l'entreprise considérée.

#### 2.2.4 Les équations

Les équations qui vont servir à modéliser le réseau, sont des équations de bilans basées sur la conservation des débits et la conservation de la masse pour les différents courants. Dans tous les exemples étudiés, on considèrera qu'il n'y a pas de perte d'eau. Les équations qui suivent sont écrites dans leur forme générique avec les notations précédemment explicitées.

- Pour un procédé  $j$ , le débit total d'eau entrant est égal au débit d'eau sortant ( $k \neq j$ ) :

$$W_1^j + \sum_k W_p^{k \rightarrow j} + \sum_m W_{rp}^{m \rightarrow j} = W_d^j + \sum_k W_p^{j \rightarrow k} + \sum_m W_{pr}^{j \rightarrow m} \quad (1)$$

- Pour un polluant  $i$  donné, le bilan de masse pour le point de mélange à l'entrée du procédé  $j$  s'écrit ( $k \neq j$ ):

$$\sum_k (W_p^{k \rightarrow j} \times C_{p_{k,i}}^s) + \sum_m (W_{rp}^{m \rightarrow j} \times C_{p_{m,i}}^s) = \left( W_1^j + \sum_k W_p^{k \rightarrow j} + \sum_m W_{rp}^{m \rightarrow j} \right) \times C_{p_{j,i}}^e \quad (2)$$

- Pour un polluant  $i$  donné, le bilan de masse associé au transfert de masse est ( $k \neq j$ ):

$$\left( W_1^j + \sum_k W_p^{k \rightarrow j} + \sum_m W_{rp}^{m \rightarrow j} \right) \times C_{p_{j,i}}^e + M_i^j = \left( W_1^j + \sum_k W_p^{k \rightarrow j} + \sum_m W_{rp}^{m \rightarrow j} \right) \times C_{p_{j,i}}^s \quad (3)$$

- De même, pour l'unité de régénération  $m$ , le débit total d'eau entrant est égal au débit total sortant ( $m \neq n$ ):

$$\sum_j W_{pr}^{j \rightarrow m} + \sum_n W_r^{n \rightarrow m} = \sum_j W_{rp}^{m \rightarrow j} + \sum_n W_r^{m \rightarrow n} + W_{rd}^m \quad (4)$$

- Le bilan de masse concernant le polluant  $i$  au point de mélange d'entrée dans l'unité de régénération  $m$ , s'écrit ( $m \neq n$ ):

$$\sum_j (W_{pr}^{j \rightarrow m} \times C_{p_{j,i}}^s) + \sum_n (W_r^{n \rightarrow m} \times C_{n,i}^s) = \left( \sum_j W_{pr}^{j \rightarrow m} + \sum_n W_r^{n \rightarrow m} \right) \times C_{m,i}^e \quad (5)$$

- Enfin, le bilan de masse pour le polluant  $i$  à la décharge est:

$$\sum_j (W_d^j \times C_{p_{j,i}}^s) + \sum_m (W_{rd}^m \times C_{m,i}^s) = \left( \sum_j W_d^j + \sum_m W_{rd}^m \right) \times C_{d,i} \quad (6)$$

### 2.2.5 Les contraintes

Les contraintes d'un problème d'optimisation précisent le domaine de valeurs que certaines des variables de décision peuvent prendre suivant les circonstances. Dans tous les réseaux, le problème est ainsi contraint par les paramètres qui ont été explicités avant dans le texte:

$$C_{p_{j,i}}^e \leq C \max_{j,i}^e \quad (7)$$

$$C_{p_{j,i}}^s \leq C \max_{j,i}^s \quad (8)$$

De même pour les unités de régénération, en fonction des données du problème on utilisera soit l'équation 9 soit l'équation 10 si les rendements sont explicites:

$$C_{r_{m,i}}^s \leq C r \max_{m,i}^s \quad (9)$$

$$R_i^m = \frac{C_{r_{m,i}}^e - C_{r_{m,i}}^s}{C_{r_{m,i}}^e} \quad (10)$$

Dans un réseau d'eau avec régénération, le débit d'eau à l'entrée des unités de régénération peut être supérieur à l'eau fraîche totale entrant dans le réseau. Par conséquent, les procédés exigeant une eau de qualité supérieure à celle sortant de l'unité de régénération



ne pourront pas être connectés seuls à l'unité de régénération. D'une manière générale, les procédés pourront utiliser de l'eau traitée, de l'eau fraîche ou même de l'eau provenant directement de la sortie des autres procédés en mélange pour satisfaire leur demande spécifique.

### *2.2.6 Type de formulation*

Tel qu'il vient d'être formulé, le problème est de type non linéaire à cause des bilinéarités causées par les produits des concentrations et des débits d'eau (équations 2, 3 et 5) représentant tous deux des variables. Ce problème doit ainsi être résolu à l'aide d'une programmation de type NLP, voire MINLP lorsque le nombre de connexions dans le réseau est considéré.

### *2.3 Développement d'une méthode d'optimisation multiobjectif*

La procédure est implémentée au sein du logiciel GAMS© (General Algebraic Modeling System) (Bonami et al., 2006) grâce au solveur CONOPT. Cependant, ce logiciel permet d'optimiser en minimisant (ou maximisant, selon les cas) un seul objectif à la fois. Suite à la revue bibliographique effectuée dans le chapitre 1, il est important de noter que très peu d'études réalisent une optimisation multicritère de réseaux d'eau industriels. Il est plus commun de choisir une fonction objectif exprimant le coût total à minimiser. Cependant, dans le contexte actuel, il est fondamental de proposer des solutions économiquement viables, tout en minimisant leur impact environnemental; l'optimisation multiobjectif prend dès lors tout son sens. De plus, une approche multicritère offre un ensemble de solutions, tandis qu'une optimisation mono-objectif ne conduit qu'à une unique solution. Enfin, la solution finalement obtenue peut ne pas être applicable au milieu industriel si elle comporte un trop grand nombre de connexions.

Plusieurs approches permettent de prendre en compte plusieurs objectifs. Les algorithmes génétiques, par exemple, précédemment évoqués en font partie (Tamaki et al., 1996) mais ne sont pas utilisés dans cette étude pour les raisons exposées plus haut (contraintes égalités très strictes). Les deux autres techniques les plus répandues sont : la somme pondérée (Zadeh, 1963 ; Kim et de Weck, 2005) et la méthode epsilon-contrainte (Marglin, 1967). La première consiste à attribuer a priori des poids à chacun des objectifs et à

minimiser la somme pondérée. Cependant elle a l'inconvénient majeur d'être beaucoup moins représentative de cas réels en raison de la subjectivité des poids affectés. De plus, elle est susceptible de ne pas trouver de solutions à des problèmes localement non-convexes, ce qui est le cas dans cette étude (Kim et de Weck, 2005). Par conséquent, une stratégie adaptée de la méthode epsilon-contrainte est mise en place pour traiter l'allocation des réseaux d'eau selon les différents objectifs énoncés plus haut.

L'optimisation multiobjectif est résolue à l'aide d'une optimisation lexicographique et est inspirée de la stratégie epsilon-contrainte (Mavrotas, 2009). Elle se réalise en plusieurs étapes afin de s'assurer que la solution obtenue est bien optimale pour l'espace considéré :

- La première étape a pour but de minimiser le premier objectif ( $F_1$ ) alors que le second ( $F_2$ ) est introduit dans le problème en tant que contrainte bornée. Les bornes sont choisies arbitrairement de manière à diviser l'espace de  $F_2$  en de nombreuses sections pour avoir autant de solutions que de sections.
- Ensuite, on réitère la première étape pour chaque fourchette de l'espace de variation de  $F_2$  compris entre les valeurs Nadir (plus mauvaise valeur du critère) et Utopia (meilleure valeur du critère) de  $F_2$ . De cette manière, un front de Pareto est tracé sur un graphique représentant les valeurs de  $F_2$  en fonction de  $F_1$ .
- Durant ces deux étapes, le troisième objectif ( $F_3$ ) est fixé à une valeur donnée. Les deux premières phases sont réitérées pour chaque valeur de  $F_3$  comprise dans l'intervalle  $[F_{3min}; F_{3max}]$ . Cette démarche est possible car le cardinal de cet intervalle est toujours réduit. Pour chaque cas particulier, les deux bornes de l'intervalle peuvent être aisément déterminées par une simple analyse de la superstructure.

Cette procédure permet de tracer des fronts de Pareto selon  $F_1$  et  $F_2$  pour chaque valeur possible de  $F_3$ . Ce sont ainsi des optimisations bicritères paramétrées par le nombre de connexions dans le réseau. La figure II-4 illustre la stratégie adoptée. Si la valeur finale obtenue est bien  $B-\varepsilon$  alors, le point (C,  $B-\varepsilon$ ) est optimal pour la fourchette considérée et peut être reporté sur le graphique. Il est procédé ainsi pour chaque fourchette  $[B-\varepsilon; B+\varepsilon]$  de l'espace  $[F_{2min}; F_{2max}]$  et pour chaque valeur de A réalisable.

Puisque les objectifs  $F_1$  et  $F_2$  sont antagonistes, la valeur maximale de  $F_2$  est atteinte lorsque  $F_1$  est au minimum et inversement.

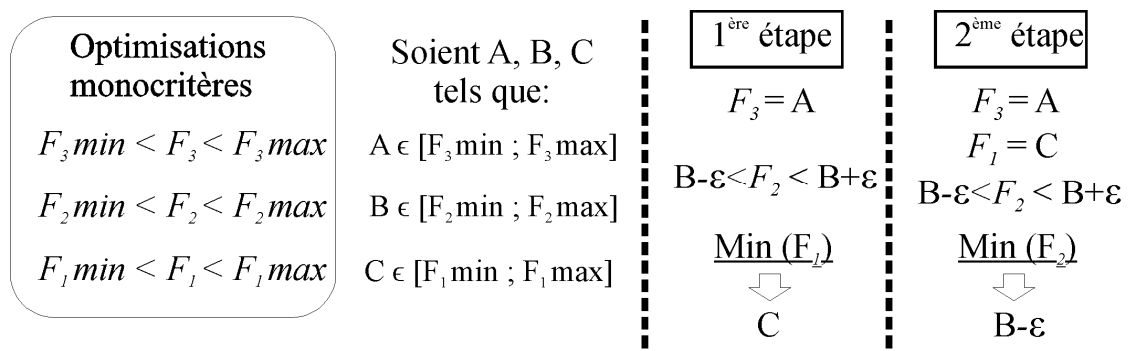


Figure II-4. Stratégie adoptée lors de l'optimisation multiobjectif

### 2.4 Cas des réseaux complexes

Le tableau II-1 représente le nombre de variables continues et binaires qu'un problème MINLP pour un réseau monopolluant contient en fonction du nombre de procédés et d'unités de régénération qui le composent.

Procédés \ Unités de régénération	1	2
	Continues / Binaires	Continues / Binaires
2	18   10	26   14
4	52   36	68   44
8	282   136	346   152
10	584   200	642   220

Tableau II-1. Nombre de variables pour différents nombre de procédés et d'unités de régénération.

Il est important de remarquer que le nombre de variables augmente très rapidement lorsque des unités sont ajoutées au problème et ce, même dans le cas monopolluant. Lorsque les problèmes sont à variables continues, ils sont considérés comme des problèmes appartenant au domaine de l'optimisation difficile. Pour ce type d'exercice, on ne connaît pas d'algorithme permettant de repérer un optimum global à coup sûr et en un nombre fini de calculs. Il existe toutefois un arsenal important de méthodes classiques dites d'optimisation globale. Les méthodes les plus classiques d'optimisation globale sont les méthodes d'optimisation par intervalles (Messine, 2006), mais compte tenu des temps de calcul, elles ne peuvent traiter efficacement que des problèmes de tailles modestes. Cependant, si la fonction

objectif ne possède pas une propriété structurelle particulière, telle que la convexité, l'optimum global sera plus difficile à obtenir.

La formulation non linéaire énoncée dans ce chapitre possède l'avantage de pouvoir traiter tous les types de réseaux qu'ils soient monopolluants ou multipolluants, elle est universelle dans les problèmes d'allocation de réseaux d'eau industriels. Cependant, elle a l'inconvénient de ne pouvoir résoudre des réseaux très complexes lorsque l'on considère le nombre de connexions et qu'une procédure de type MINLP doit être utilisée (cas multipolluant). Quand un réseau incluant un seul polluant est optimisé selon plusieurs objectifs, quelques simplifications peuvent être réalisées et conduisent à une résolution plus efficace. C'est l'objet de la partie 3 de ce chapitre qui se focalise sur l'étude des réseaux monopolluants.

### 3. Formulation MILP : cas des réseaux d'eau monopolluants

Cette partie a pour but de proposer une nouvelle écriture du problème dans le cas particulier des réseaux d'eau monopolluants. En effet, des simplifications permettent de linéariser la formulation initiale. Pour cela, il est nécessaire de redéfinir tout ce qui compose le problème : les variables, équations et contraintes doivent être remaniées.

#### 3.1 Phase de formulation et de définition

##### 3.1.1 Les variables

La linéarisation du problème s'accompagne de la génération de nouvelles variables. En effet, la transformation de la formulation passe par l'utilisation de débits partiels au lieu de débits totaux. Les polluants seront désormais caractérisés par un débit (g/h) au lieu de concentrations (en ppm). Le débit partiel d'un polluant est lié à sa concentration, au débit partiel d'eau du courant associé (T/h) par la définition suivante (en considérant un courant allant d'un procédé  $j$  vers un procédé  $k$ ) :

$$\frac{wp_{i>1}^{j \rightarrow k}}{wp_1^{j \rightarrow k} + \sum_{i=2}^{N+1} wp_i^{j \rightarrow k}} = C_j^s \quad (11)$$

Le dénominateur,  $wp_1^{j \rightarrow k} + \sum_{i=2}^{N+1} wp_i^{j \rightarrow k}$  représente le débit total du courant concerné.

Ce terme peut être réduit lorsqu'une attention est accordée aux ordres de grandeur et unités qui le composent. En effet,  $wp_1^{j \rightarrow k}$  est exprimé en T/h alors que l'unité de  $wp_{i>1}^{j \rightarrow k}$  est le g/h (soit  $10^{-6}$  T/h). Cette simplification permet d'écrire la relation (12) menant à l'équation (13) qui donne la définition de ce qui est utilisé dans cette étude pour le terme « débit partiel d'un polluant » :

$$\frac{wp_{i>1}^{j \rightarrow k}}{wp_1^{j \rightarrow k}} = C \max_{i,j}^s \quad (12)$$

$$wp_{i>1}^{j \rightarrow k} = C \max_{i,j}^s \times wp_1^{j \rightarrow k} \quad (13)$$

Il est important de noter que les équations sont exprimées dans le cas monopolluant avec l'indice  $i>1$  (soit  $i=2$  dans ce cas) se référant au seul polluant du réseau ( $i=1$  étant le débit d'eau).

### 3.1.2 Les équations

A partir de ces variables, les équations de la première partie sont transformées et deviennent toutes linéaires. En effet, en utilisant des débits partiels au lieu de débits totaux, il n'y a plus de bilinéarités causées par les produits des concentrations et des débits d'eau. Ainsi, pour chaque procédé et chaque unité de régénération, les bilans sur les entrées et sorties sont écrits comme suit:

- Pour un procédé  $j$  donné, le débit total d'eau entrant est égal au débit total d'eau sortant ( $k \neq j$ ) :

$$w_1^j + \sum_k wp_1^{k \rightarrow j} + \sum_m wrp_1^{m \rightarrow j} = wd_1^j + \sum_k wp_1^{j \rightarrow k} + \sum_m wpr_1^{j \rightarrow m} \quad (14)$$

- De même, pour un procédé  $j$  donné, le débit total de polluant entrant est égal au débit total de polluant sortant plus le débit ajouté par le procédé en question ( $k \neq j$ ):

$$\sum_k wp_{i>1}^{k \rightarrow j} + \sum_m wrp_{i>1}^{m \rightarrow j} + M_{i>1}^j = wd_{i>1}^j + \sum_k wp_{i>1}^{j \rightarrow k} + \sum_m wpr_{i>1}^{j \rightarrow m} \quad (15)$$

- Pour une unité de régénération  $m$  donnée, le débit total d'eau entrant est égal à celui qui sort ( $m \neq n$ ):

$$\sum_n wr_1^{n \rightarrow m} + \sum_j wpr_1^{j \rightarrow m} = wrd_1^m + \sum_j wrp_1^{m \rightarrow j} + \sum_n wr_1^{m \rightarrow n} \quad (16)$$

- De même, pour l'unité de régénération  $m$ , le débit total de polluant entrant est égal au débit total jeté à la décharge plus le débit total sortant :

$$\sum_n wr_{i>1}^{n \rightarrow m} + \sum_j wpr_{i>1}^{j \rightarrow m} = wrd_{i>1}^m + \sum_j wrp_{i>1}^{m \rightarrow j} + \sum_n wr_{i>1}^{m \rightarrow n} \quad (17)$$

- Le débit total d'eau entrant dans le réseau doit être égal à tout ce qui sort à la décharge :

$$\sum_m wrd_1^m + \sum_j wd_1^j = \sum_j w_1^j \quad (18)$$

- Le débit total en polluant entrant dans le réseau est égal au débit massique total de polluant allant à la décharge :

$$\sum_m wrd_{i>1}^m + \sum_j wd_{i>1}^j = \sum_j M_{i>1}^j \quad (19)$$

### 3.1.3 Les contraintes

Chaque procédé est limité par des concentrations des polluants en entrée et sortie suivant ces inégalités, écrites pour un procédé  $j$  donné:

$$wp_{j,i>1}^e \leq C \max_j^e \times wp_{j,1}^e \quad (20)$$

$$wp_{j,i>1}^s \leq C \max_j^s \times wp_{j,1}^s \quad (21)$$

De la même manière, la concentration à la sortie de l'unité de régénération est fixée et conduit à l'égalité (22) :

$$wr_{m,i>1}^s = Cr_m^s \times wr_{m,1}^s \quad (22)$$

L'ajout des contraintes précédentes entraîne des modifications conséquentes ; notamment les équations (21) et (22) car elles représentent des équations de bilans au niveau de diviseurs. Par conséquent, les courants sortants d'un procédé donné doivent tous posséder la même concentration en polluant, pour un procédé  $j$ , ce qui se traduit par la relation mathématique suivante :

$$0 = wp_{i>1}^{j \rightarrow k} - C \max_j^s \times wp_1^{j \rightarrow k} = wpr_{i>1}^{j \rightarrow m} - C \max_j^s \times wpr_1^{j \rightarrow m} = wd_{i>1}^j - C \max_j^s \times wd_1^j \quad (23)$$

De façon analogue pour l'unité de régénération  $m$ :

$$0 = wr_{i>l}^{m \rightarrow n} - Cr_m^s \times wr_l^{m \rightarrow n} = wrp_{i>l}^{m \rightarrow j} - Cr_m^s \times wrp_l^{m \rightarrow j} \quad (24)$$

Cependant, ces différentes égalités induisent une condition importante. En effet, si le débit d'eau d'un des courants sortant est nul, ce courant n'existe pas, ce qui se traduit par la condition logique suivante :

$$\text{Si } wp_l^{j \rightarrow k} = 0 \text{ alors } wp_{i>l}^{j \rightarrow k} = 0 \quad (25)$$

Si par exemple, le procédé  $j$  ne distribue pas d'eau à un autre procédé  $k$ , l'équation (23) devient :

$$0 = wpr_{i>l}^{j \rightarrow m} - C \max_j^s \times wpr_l^{j \rightarrow m} = wd_{i>l}^j - C \max_j^s \times wd_l^j \quad (26)$$

$$\text{Cela implique que: } wpr_{i>l}^{j \rightarrow m} = C \max_j^s \times wpr_l^{j \rightarrow m} \quad (27)$$

La démonstration précédente transforme l'équation (21) d'une inégalité en égalité. Ceci implique que les concentrations en polluant à la sortie des procédés soient égales à la concentration maximale autorisée :  $C \max_j^s$ , et ce, pour chaque procédé du réseau. Cette condition ne compromet pas la garantie de trouver une solution optimale, car formulé de cette manière, le problème vérifie toutes les « conditions d'optimalité nécessaires » pour un réseau monopolluant décrites par Savelski et Bagajewicz (2000). Les théorèmes décrits dans cette étude (Savelski et Bagajewicz, 2000) et concernant les concentrations de sortie des différentes unités de procédé, sont les suivantes, lorsque  $F_l$  (le débit d'eau fraîche) est minimisé :

- ***Théorème 1*** : si une solution du problème d'allocation est optimale, alors les concentrations de sortie des procédés de tête seront égales au maximum autorisé. Sinon, une solution équivalente avec la même consommation d'eau fraîche existe pour lesquelles les concentrations sont situées sur les bornes maximales.
- ***Théorème 2*** : si une solution du problème d'allocation est optimale, alors les concentrations de sortie des procédés intermédiaires seront égales au maximum autorisé. Sinon, une solution équivalente avec la même consommation d'eau fraîche existe pour lesquelles les concentrations sont situées sur les bornes maximales.

- ***Théorème 3*** : *si une solution du problème d'allocation est optimale, alors les concentrations de sortie des procédés terminaux seront égales au maximum autorisé. Sinon, une solution équivalente avec la même consommation d'eau fraîche existe pour lesquelles les concentrations sont situées sur les bornes maximales. »*

Dans un réseau d'eau, par définition, chaque procédé appartient forcément à une des trois catégories : de tête, intermédiaire ou terminal ; ainsi, la contrainte (26) ne constitue pas un obstacle aux conditions d'optimalité démontrées par Savelski et Bagajewiz (2000). Le problème est linéaire et peut être résolu grâce à une procédure LP (linear programming).

Néanmoins, pour évaluer la complexité du réseau, comme il a été précisé précédemment, des variables binaires sont associées à chaque courant. Cela change la procédure en une forme MILP (mixed integer linear programming). Ces variables sont ajoutées dans le programme à l'aide de contraintes supplémentaires :

$$wp_l^{j \rightarrow k} \leq yp^{j \rightarrow k} \times U \quad (28)$$

Où U est être un grand nombre, beaucoup plus grand que les débits massiques de chaque courant du réseau.

Enfin, pour éviter d'introduire des débits trop faibles dans le réseau, la contrainte (29) est ajoutée au problème. Dans la réalité, les connexions impliquant des débits inférieurs à 2 T/h engendrent des tuyaux dont le diamètre est inférieur à 1 pouce (2.82 cm) et sont donc à proscrire dans les solutions proposées. Il n'est pas nécessaire d'investir dans des connexions faisant circuler des débits d'eau très faibles :

$$(2 - wp_l^{j \rightarrow k}) \leq U \times (1 - yp^{j \rightarrow k}) \quad (29)$$

Cette contrainte implique que lorsque le débit est inférieur à 2, le terme de gauche est positif et engendre ainsi un y nul dans le terme de droite. A l'inverse, si le débit est supérieur à 2, le terme de gauche devient négatif et le y peut alors valoir un ou zéro en fonction des autres contraintes du problème.



### 3.1.4 *Type de formulation*

Le fait d'utiliser des débits partiels à la place de débits totaux fait disparaître les bilinéarités précédemment rencontrées lors de l'écriture des équations de bilan pour la formulation générale (résolue à l'aide d'une procédure de type NLP). En effet, les équations (14) à (19) deviennent toutes linéaires. Cependant, l'introduction de débits partiels implique que les contraintes inégalités sur les concentrations de sortie (équation 20) soient transformées en contraintes égalités (équation 27). Cela revient à admettre que les concentrations de sortie de chaque unité de procédé sont égales aux concentrations maximales de sortie. Cela dit, cette condition ne compromet pas d'obtenir une solution optimale puisque les conditions d'optimalité énoncées par Savelski et Bagajewicz (2000) sont vérifiées même dans ce cas. Elles stipulent que les solutions optimales sont celles pour lesquelles les concentrations de sortie du polluant sont fixées à leurs valeurs maximales. Le problème, dans le cas monopolluant, est ainsi linéaire puisque toutes les équations de bilan et les contraintes le sont également. Il doit être résolu à l'aide d'une programmation de type LP/MILP.

## 3.2 *Phase de validation*

Le problème d'optimisation d'un réseau à un seul polluant est à présent formulé dans sa globalité en tant que problème MILP, deux exemples de réseaux d'eau industriels sont ainsi optimisés. Le premier est issu d'une publication de Feng et al. (2007), tandis que le second, plus complexe, provient d'une étude de Bagajewicz et al. (2001). Pour chacun des deux réseaux, une optimisation multicritère a été réalisée selon la technique lexicographique adaptée de la méthode epsilon-contrainte explicitée dans la partie 1.

### 3.2.1 *Réseau de Feng et al. (2007)*

- *Présentation*

Le réseau est extrait d'une étude de Feng et al. (2007) et est composé de quatre procédés, une unité de régénération et un polluant. Pour ce problème, 65 équations et 74 variables sont ainsi mises en jeu. De plus, l'addition de variables binaires ajoute au problème 50 équations et 28 variables. Le tableau II-2 rappelle les données du problème énoncées par Feng et al. (2007).

<i>Procédé</i>	$C_{max_j^e}$ (ppm)	$C_{max_j^s}$ (ppm)	$M_i^j$ (g/h)
1	0	100	6000
2	50	150	4000
3	75	100	2500
4	100	125	1250

**Tableau II-2. Paramètres du réseau de Feng et al. (2007).**

- *Optimisations monocritères et bicritères*

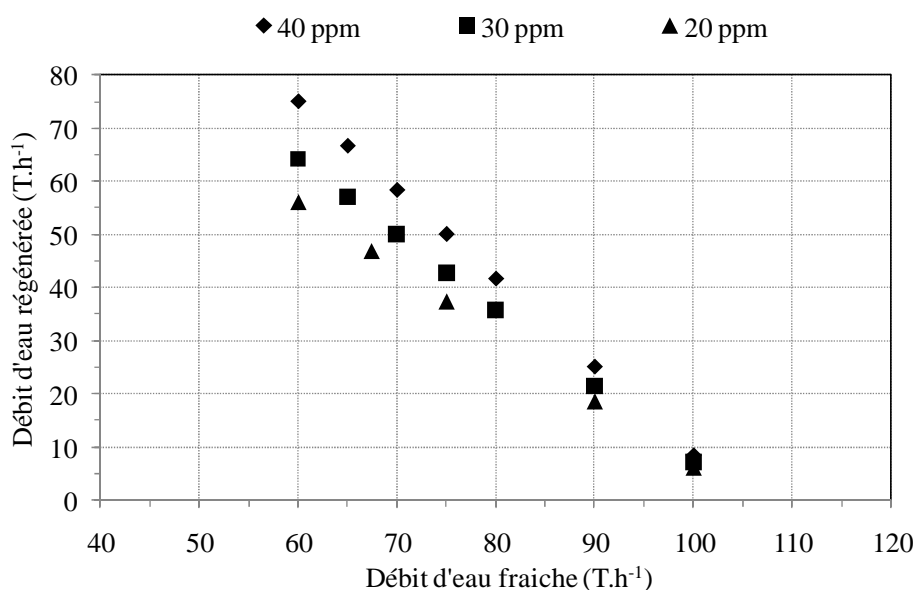
Dans un premier temps, des optimisations monocritères sont réalisées afin de pouvoir trouver les différents intervalles au sein desquels les 3 critères varient :  $[F_{1min}, F_{1max}]$ ,  $[F_{2min}, F_{2max}]$  et  $[F_{3min}, F_{3max}]$ . Dans le tableau II-3, sont reportés les résultats de ces calculs où, pour chaque ligne, le nombre en gras représente le résultat du critère minimisé.

	<i>Nombre de connexions</i>	<i>Débit d'eau fraîche (T/h)</i>	<i>Débit d'eau régénérée (T/h)</i>
Nombre de connexions	<b>5</b>	112	25
Débit d'eau fraîche (T/h)	28	<b>60</b>	95
Débit d'eau régénérée (T/h)	28	122	<b>0</b>

**Tableau II-3. Résultats des optimisations monocritères du réseau 1**

Ceci montre que le nombre de connexions varie entre 5 et 28. En effet, lorsque cette valeur est minimisée, le résultat est 5 et quand il est laissé libre il vaut 28, qui représente donc la valeur maximale de l'intervalle. Le débit d'eau fraîche minimum est de 60 T/h, valeur précédemment obtenue par Feng et al. (2007). Enfin, le débit d'eau régénérée minimal vaut 0, ce qui représente le cas où l'unité de régénération n'est pas en fonctionnement. C'est donc un cas qui n'a pas vraiment d'intérêt dans le problème traité présentement puisque celui-ci doit comporter une unité traitant l'eau. Le graphique II-5 montre que les débits d'eau dans le réseau varient dans le même sens que les concentrations en sortie de l'unité de régénération : plus la concentration de sortie augmente et plus les débits d'eau impliqués sont importants.

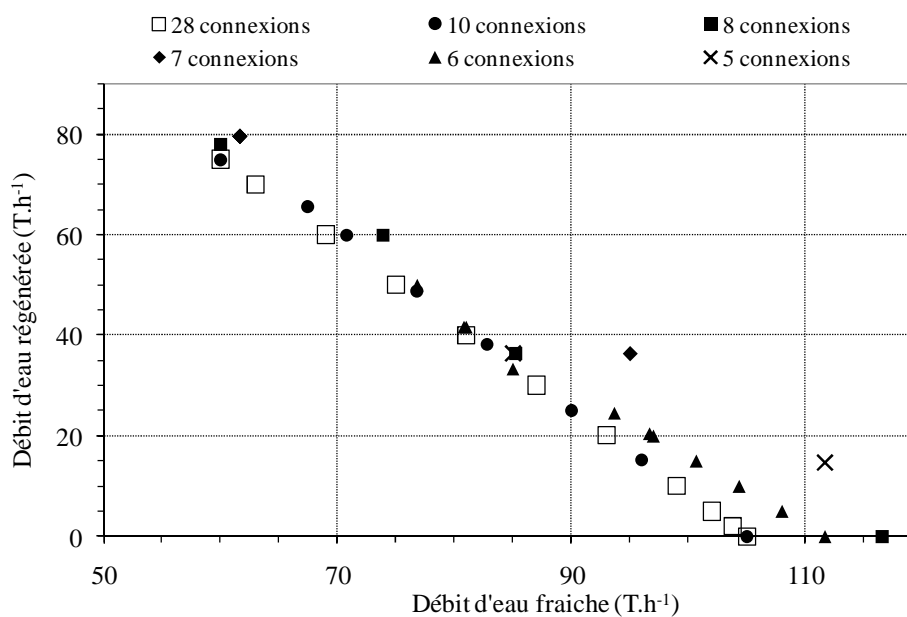
Ceci s'explique par le fait que lorsque l'unité de régénération traite davantage l'eau (20 ppm), elle peut être redistribuée plus facilement vers les procédés et donc le débit d'eau régénérée diminue. Traiter l'eau à des concentrations plus faibles engendre un coût plus important pour l'industrie tandis qu'impliquer des débits d'eau plus importants est plus avantageux d'un point de vue environnemental.



**Figure II-5. Résultats de l'optimisation sur l'exemple de Feng et al. (2007).  
Calculs pour différentes valeurs de concentration en sortie de l'unité de régénération.**

- *Optimisations multicritères*

Le nombre maximal de connexions variant entre 5 et 28, les optimisations bicritères sont réalisées pour différentes valeurs dans cet intervalle et les résultats sont illustrés sur la figure II-6 sous forme de fronts de Pareto :



**Figure II-6. Résultats des optimisations bicritères pour différents nombres de connexions dans le réseau.**

Davantage de solutions ont été obtenues suite à l'optimisation du réseau, cependant, seules les solutions non dominées sont retenues pour la décision finale. Par définition, pour qu'une solution soit intéressante, il faut qu'il existe une relation de dominance au sens de Pareto entre la solution considérée et les autres solutions dans le sens suivant :

*On dit que le vecteur  $\bar{x}_1$  domine le vecteur  $\bar{x}_2$  si  $\bar{x}_1$  est au moins aussi bon que  $\bar{x}_2$  pour tous les objectifs et  $\bar{x}_1$  est strictement meilleur que  $\bar{x}_2$  pour au moins un des objectifs.*

Ainsi, un vecteur  $\bar{x}$  est optimal globalement au sens de Pareto s'il n'existe pas de vecteur  $\bar{x}'$  tel que  $\bar{x}'$  domine le vecteur  $\bar{x}$ . La figure II-6 représente donc les différents fronts de Pareto avec en abscisses le débit d'eau fraîche exprimé en T/h et en ordonnées, le débit d'eau à l'entrée de la régénération également en T/h.

- **Pour 28 connexions** : l'ensemble des courants existe, cela revient à un problème bi-objectif (LP). L'espace des solutions est une droite sur laquelle tous les points sont des solutions réalisables. Lorsque toutes les connexions sont possibles, le débit d'eau fraîche le plus faible correspond à 60 T/h. Cependant, puisque les deux objectifs sont antagonistes, cette faible valeur engendre un débit d'eau régénérée élevé. En revanche, si l'unité de régénération est réduite à son minimum soit zéro, le débit d'eau fraîche dans le réseau doit augmenter et passe à un débit de 105 T/h.
- **Pour 6, 7, 8 et 10 connexions** (valeurs intermédiaires) : la première remarque à noter est le fait qu'il existe moins de solutions que dans le cas précédent (avec toutes les connexions possibles). En effet, plus un système est contraint, plus le nombre de solutions faisables diminue. Une valeur notable change pour ces différentes séries : le minimum du débit d'eau fraîche, la figure II-7 illustre cette tendance.

D'après cette figure, un réseau incluant 10 connexions nécessite la même entrée d'eau fraîche qu'un réseau avec 28 connexions. C'est lorsque le réseau possède moins de 10 connexions que le débit d'eau fraîche minimal augmente. Par exemple, pour 7 connexions, le débit minimal pouvant être atteint vaut 62 T/h.

Avec 10 connexions, les mêmes ordres de grandeur de débits d'eau qu'avec 28 connexions sont atteints. Ce type de réseaux représente ainsi des solutions intéressantes puisqu'ils offrent des débits d'eau faibles et une topologie relativement simple.

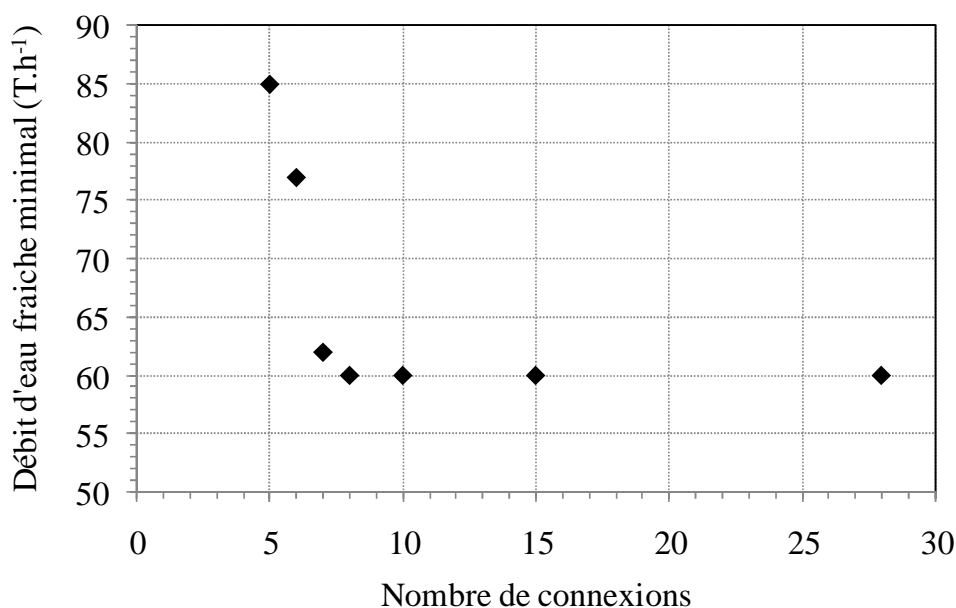


Figure II-7. Valeurs du débit minimal d'eau fraîche pour un nombre de connexions fixé

- **Pour 5 connexions** : valeur minimale du nombre connexions, il est impossible de construire ce réseau avec moins de 5 connexions. Le système est ici bien contraint et par conséquent, le nombre de solutions faisables baisse : il n'en existe plus que deux. De plus, le minimum d'eau fraîche n'est plus de 60 T/h, mais de 85 T/h. Ceci est logique, le réseau étant plus contraint, il nécessite davantage d'eau fraîche.
- *Conclusions du premier exemple*

Les principales conclusions de cette première étude sont les suivantes :

- Le débit minimal d'eau fraîche obtenu avec ce réseau est égal à 60 T/h pour un nombre de connexions supérieur à 7. Cette valeur est en accord avec celle donnée par Feng et al. (2007).
- Lorsque le nombre de connexions est réduit à son minimum, le débit d'eau fraîche devra forcément augmenter pour satisfaire toutes les contraintes et vaut 85 T/h.
- Le débit d'entrée à la régénération est inversement proportionnel au débit d'eau fraîche à l'entrée du réseau.

Une remarque importante peut être faite suite à cette optimisation multiobjectif. Dans les études antérieures (Tudor, 2007 ; Feng et al., 2007), l'optimisation est réalisée pour un

seul objectif : le débit d'eau fraîche. C'est donc une seule solution qui est choisie. Cette étude montre que de nombreuses solutions intéressantes existent et méritent de faire l'objet d'une étude post-optimisation pour aider le décideur à prendre une décision parmi celles qui sont proposées ; c'est ce qui est mis en œuvre pour le second exemple étudié. Enfin, le fait de fixer les concentrations de sortie à leur valeur maximale (conditions d'optimalité) n'affecte pas les valeurs obtenues puisque la cible minimale d'eau fraîche est atteinte et correspond à celle avancée dans les travaux antérieurs (Feng et al., 2007).

### 3.2.2 Réseau de Bagajewicz et al. (2001)

Le deuxième exemple provient d'une étude plus ancienne de Bagajewicz et al. (2001). Feng et al. (2008) avaient eux aussi repris ce réseau pour valider leur méthode MINLP. Ainsi, plusieurs études ayant obtenu les mêmes résultats sur ce réseau, permettent de valider la méthode pour les réseaux à un seul polluant. Cet exemple est plus complexe que le précédent car il comporte un nombre plus important de procédés.

- *Présentation du réseau*

Le réseau, tel qu'il a été décrit par Bagajewicz et al. (2001) est polluant de dix procédés, une unité de régénération et un polluant. Les caractéristiques de ce réseau sont représentées dans le tableau II-4 et la concentration en sortie de l'unité de régénération est de 5 ppm. Le fait d'augmenter le nombre de procédés a pour effet d'augmenter considérablement le nombre d'équations, de contraintes et de variables. En effet, le problème contient désormais 143 variables discrètes, 351 équations et 475 variables (dont les variables binaires).

<i>Procédé</i>	$C_{\max_j^e}$ (ppm)	$C_{\max_j^s}$ (ppm)	$M_i^j$ (g/h)
1	25	80	2000
2	25	90	2880
3	25	200	4000
4	50	100	3000
5	50	800	30000
6	400	800	5000
7	400	600	2000
8	0	100	1000
9	50	300	20000
10	150	300	6500

Tableau II-4. Paramètres fixés pour le réseau extrait de Bagajewicz et al. (2001)

- *Optimisations monocritères*

De la même façon que pour l'exemple 1, voici les valeurs obtenues pour l'exemple 2. L'optimisation a d'abord été menée de façon monocritère et a conduit aux résultats suivants :

- Le nombre de connexions minimum pour ce réseau est de 11.
- Le minimum d'eau fraîche est de 10 T/h.
- Le minimum d'eau pouvant être régénérée est de 0 T/h.

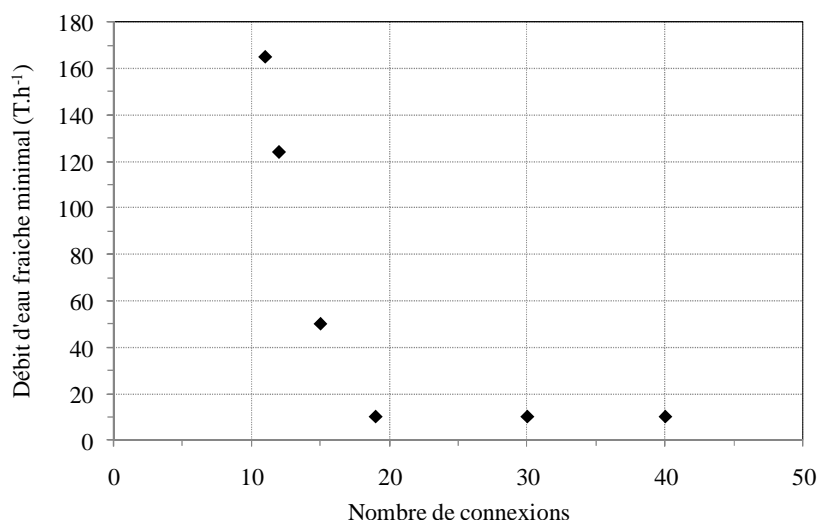
Le tableau II-5 indique les valeurs des deux autres critères laissés libres lors de l'optimisation monocritère.

	<i>Nombre de connexions</i>	<i>Débit d'eau fraîche (T/h)</i>	<i>Débit d'eau régénérée (T/h)</i>
Nombre de connexions	<b>11</b>	205	38
Débit d'eau fraîche	120	<b>10</b>	196
Débit d'eau régénérée	120	231	<b>0</b>

**Tableau II-5. Résultats des optimisations monocritères**

- *Optimisations multicritères*

De façon analogue à ce qui a été réalisé lors du premier exemple, le débit d'eau fraîche minimal est calculé pour différents nombres de connexions compris dans l'intervalle [11, 120]. La figure II-8 illustre ces résultats.



**Figure II-8. Débit d'eau fraîche minimum pour un nombre de connexions donné.**

Pour des nombres de connexions compris entre 19 et 120, le débit d'eau fraîche minimal est de 10 T/h, valeur identique à celle obtenue lors des optimisations monocritères. Lorsque le réseau comporte seulement 11 connexions, valeur minimale, le débit d'eau fraîche augmente considérablement puisqu'il atteint 162 T/h.

Les résultats des optimisations bicritères paramétrées par le nombre de connexions sont illustrés par la figure II-9.

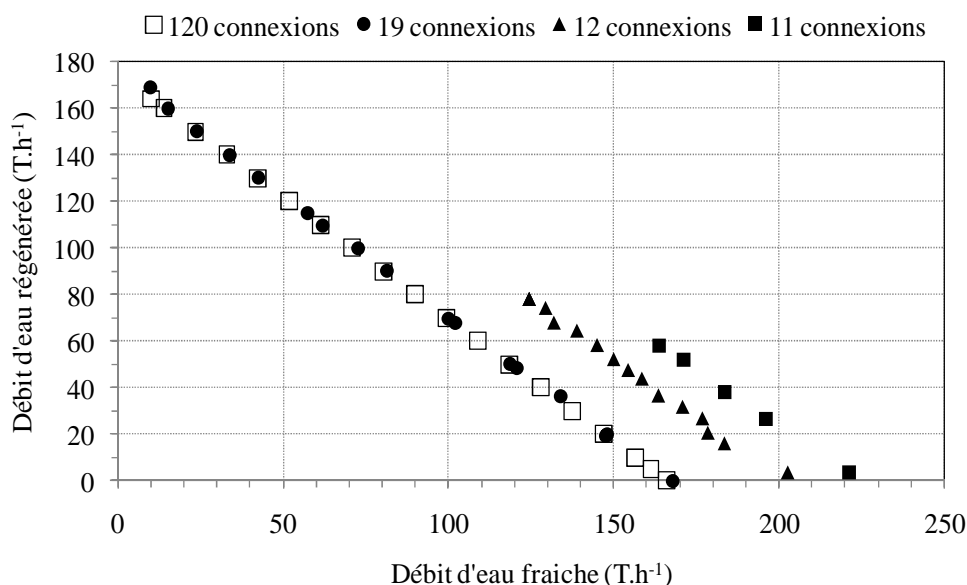


Figure II-9. Courbes de Pareto obtenues après optimisation avec CPLEX 9.0.

- **Lorsque le nombre de connexions est égal au maximum** : le système est libre (120 connexions). Toutes les solutions pour le réseau et les deux autres critères se trouvent sur une droite. Tous les points situés sur la droite sont des solutions faisables et réalisables pour le réseau, on se retrouve dans le cas d'une optimisation bicritère (débit d'eau fraîche versus débit d'eau régénérée) (LP).
- **Lorsque le nombre de connexions est égal au minimum (11)**: la figure montre qu'au delà d'un débit de 60 T/h d'eau régénérée et de 162 T/h d'eau fraîche, il n'existe plus de solution pouvant satisfaire le système. Il est important d'ajouter qu'entre les différents points portés sur le graphique, aucune autre solution n'est trouvée. Il existe ainsi un nombre restreint de solutions : seulement cinq réseaux sont possibles pour ce nombre de connexions.



- **Lorsque 19 connexions composent le réseau** : les mêmes débits d'eau que pour 120 connexions sont atteints, la figure 8 mettrait également en évidence ces valeurs. Cela signifie qu'un réseau à 19 connexions sera toujours préféré à un réseau en comportant un nombre plus élevé.

La question qui se pose maintenant est : parmi les solutions proposées, quel réseau doit-on choisir en considérant les 3 objectifs de façon simultanée ?

- *Aide à la décision parmi des choix multiples*

Afin de choisir un réseau parmi les solutions proposées dans la figure II-9, un nouvel indicateur économique est mis en place : le coût équivalent global (CEG) mesuré en débits d'eau équivalents. Ce nouvel outil permet d'exprimer le coût total d'un réseau en termes de quantité d'eau fraîche et non en unité monétaire (Boix et al., 2011). Pour le calculer, il est nécessaire de prendre en compte les débits d'eau fraîche, d'eau régénérée et d'eau déversée à l'égout. Ces différentes variables sont alors pondérées par leur contribution relativement à celle de l'eau fraîche (prise comme référence, soit égale à 1). Les trois critères sont alors rassemblés en un seul par la relation suivante :

$$CEG = F_1 + R + D \quad (29)$$

Avec  $R$  et  $D$  étant les contributions des débits d'eau régénérée et rejetée à l'égout, avec:

$$R = \alpha \times F_2 \quad \text{et} \quad D = \beta \times F_D \quad (30) \quad (31)$$

Avec  $F_1$  le débit d'eau fraîche,  $F_2$ , le débit d'eau régénérée et  $F_D$ , le débit d'eau rejetée à l'égout.

Dans la précédente relation,  $\alpha$  et  $\beta$  sont respectivement liés au coût de régénération de l'eau et au coût de post-traitement de l'eau envoyée à la décharge.  $\alpha$  dépend du type d'unité de régénération utilisée dans le réseau (Tableau II-6) et  $\beta$  est égal à 5.625 selon Bagajewicz et Faria (2009). Bien sûr, les valeurs de  $\alpha$  et  $\beta$  peuvent dépendre de la localisation géographique de l'étude, mais elles sont moins sujettes à caution qu'une expression du coût en devises. Les valeurs reportées ci-dessous sont couramment admises dans la littérature dédiée.

Type d'unité de régénération	Concentration post-régénération (ppm)	$\alpha$
I	50	0.375
II	20	1.75
III	5	3.125

Tableau II-6. Valeurs du paramètre  $\alpha$  en fonction de l'unité de régénération

Dans l'exemple étudié, l'eau sort de l'unité de régénération avec une concentration de 5 ppm, c'est donc une unité de type III :

$$CEG = 6.625 \times F_1 + 3.125 \times F_2 \quad (32)$$

Pour différentes valeurs du nombre de connexions, le CEG est calculé et reporté sur la figure II-10. Pour un nombre de connexions compris entre 17 et 19, le CEG se situe autour de 600 T/h et augmente très vite pour des réseaux beaucoup plus simples. Il atteint ainsi 1260 T/h pour un réseau incluant 11 connexions.

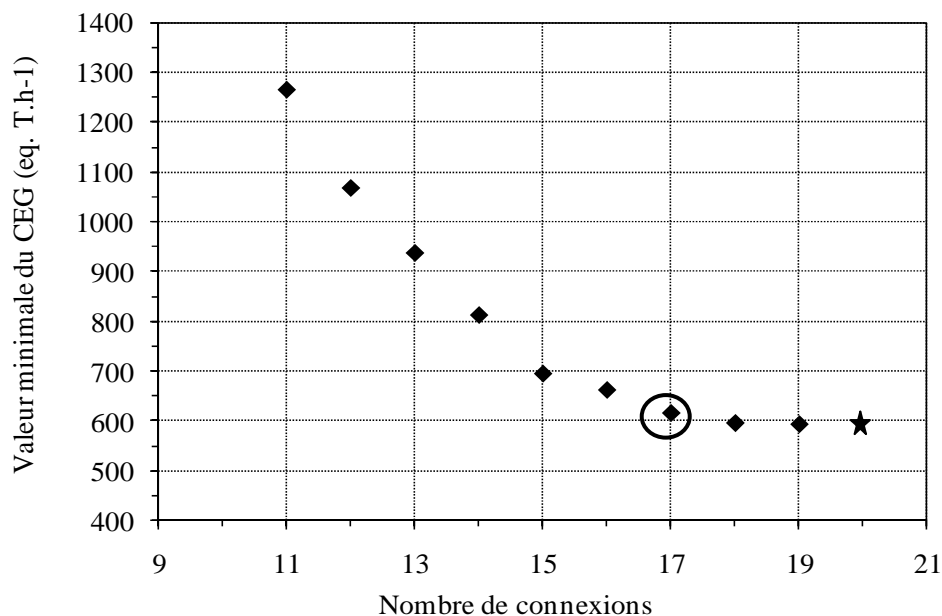


Figure II-10. CEG minimal obtenu pour un nombre de connexions donné. L'étoile représente la solution obtenue par Bagajewicz et al. (2001).

Un bon compromis semble être le réseau encerclé sur la figure II-10. En effet, il inclut 17 connexions pour CEG de 619 T/h. Ceci correspond à des consommations d'eau fraîche de 10 T/h (minimum atteint pour ce réseau) et d'eau régénérée de 177 T/h. Le schéma de ce réseau est illustré sur la figure II-11.

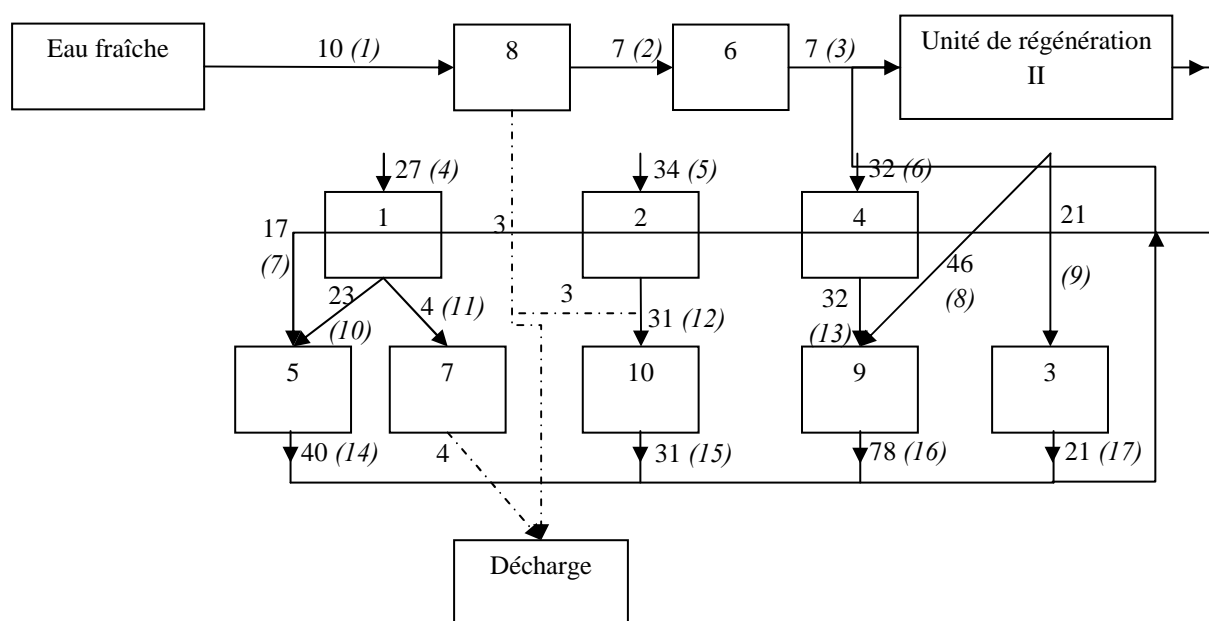


Figure II-11. Schéma du réseau choisi (cerclé sur la figure II-10). Les nombres en italiques représentent le numéro de la connexion, ceux en écriture normale sont les débits d'eau exprimés en T/h et les flèches en pointillées sont les débits allant à l'égout (non comptabilisés dans le nombre de connexions).

- *Conclusions*

Pour terminer cet exemple, il est important de noter que les valeurs ayant été mises en évidence au cours de l'optimisation sont les mêmes que celles obtenues par Feng et al. (2008) et par Bagajewicz et al. (2001), la méthode utilisée est donc validée. Ensuite, les résultats de l'exemple 2 peuvent être résumés en deux points essentiels :

- la réduction du front de Pareto au fur et à mesure que le nombre de connexions est réduit,
- la discrétisation des solutions représentées par des points sur une même droite lorsque le nombre de connexions est réduit, donc que le système est plus contraint.

#### 4. Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre, une formulation non linéaire est proposée dans l'optique de traiter des cas de réseaux les plus divers. En effet, cette formulation générale est capable de résoudre aussi bien les réseaux multipolluants que ceux ne contenant qu'un seul polluant. Cependant, dans le cas particulier de réseaux d'eau monopolluants, des hypothèses permettent de simplifier la formulation sans compromettre les conditions d'optimalité

précédemment énoncées par Savelski et Bagajewicz (2000). Celles-ci précisent que la concentration du polluant en sortie des différentes unités du procédé est forcément égale à la concentration maximale lorsqu'une solution optimale est obtenue. De fait, en fixant les concentrations de sortie égales aux bornes maximales, la formulation devient de type MILP.

L'optimisation multiobjectif est implémentée à l'aide du logiciel GAMS et résolue grâce au solveur CPLEX 9.0. Les objectifs considérés dans ce chapitre sont : le débit d'eau fraîche, le débit d'eau régénérée et le nombre connexions. Ces trois objectifs sont minimisés à l'aide d'une stratégie adaptée de la méthode epsilon-contrainte (Mavrotas et al., 2009). Deux exemples extraits de la littérature sont étudiés afin de pouvoir comparer les résultats obtenus dans cette étude et ceux des études antérieures. Les résultats montrent que la méthode multiobjectif permet d'améliorer les précédentes solutions en sélectionnant un réseau ne consommant pas forcément le minimum d'eau fraîche. Ainsi, à l'aide d'un nouvel indicateur, le coût équivalent global (CEG) un réseau plus intéressant en termes de consommations d'eau peut être proposé.

L'étude exposée au cours de ce chapitre a permis plusieurs avancées notables concernant l'allocation des réseaux d'eau monopolluants :

- 1) Une formulation innovante à l'aide de débits partiels conduit à une formulation MILP d'une implémentation aisée et adaptable à tous les réseaux monopolluants.
- 2) Un nouvel outil, le CEG permet d'exprimer un coût en équivalent d'eau fraîche afin d'éviter une utilisation de coûts trop dépendants du lieu où l'industrie est implantée et des fluctuations monétaires.
- 3) Une approche multiobjectif est intéressante dans un tel contexte puisqu'elle entraîne une amélioration significative du réseau choisi par rapport aux études antérieures (Bagajewicz et al., 2001). De plus, l'approche utilisée permet d'obtenir des réseaux topologiquement simples et n'impliquant aucun débit d'eau très faible, contrairement aux résultats de la littérature.

---

---

*CHAPITRE III – Etude des réseaux  
d'eau multipolluants*

---

---

## Nomenclature du chapitre

Les indices  $i=1$  et  $i>1$  sont respectivement attribués à l'eau et aux divers polluants.  
 $j$  et  $k$  représentent les unités de procédé et  $m$  et  $n$  les unités de régénération.

$w_{P_i}^{j \rightarrow k}$	débit massique du composé $i$ allant du procédé $j$ au procédé $k$ (T/h)
$w_{Pr_i}^{j \rightarrow m}$	débit massique du composé $i$ allant du procédé $j$ à l'unité de régénération $m$ (T/h)
$w_{D_i}^j$	débit massique du composé $i$ allant du procédé $j$ à la décharge (T/h)
$w_f^j$	débit d'eau fraîche entrant dans le procédé $j$ (T/h)
$C_{j,i}^{max^e}$	concentration maximale du polluant $i$ à l'entrée du procédé $j$ (ppm)
$C_{j,i}^{max^s}$	concentration maximale du polluant $i$ à la sortie du procédé $j$ (ppm)
$Cr_{m,i}^s$	concentration du polluant $i$ à la sortie de l'unité de régénération $m$ (ppm)
$M_i^j$	charge en polluant $i$ générée par l'unité de procédé $j$ (g/h)
$C_{j,i}^s$	concentration du polluant $i$ à la sortie du procédé $j$ (ppm)
$Cr_{m,i}^s$	concentration du polluant $i$ à la sortie de l'unité de régénération $m$ (ppm)
$F_1$	fonction-objectif 1 : consommation totale d'eau fraîche (T/h)
$F_2$	fonction-objectif 2 : débit total d'eau régénérée (T/h)
$F_3$	fonction-objectif 3 : nombre total d'interconnexions
$F_D$	débit d'eau rejeté à la décharge (T/h)

Dans le chapitre précédent, des exemples d'industries contenant un seul polluant ont été étudiés. C'est le cas par exemple d'une industrie papetière avec pour seul polluant des fibres en suspension. Cependant, ce type d'industries est assez rare car la majorité des activités industrielles génèrent de nombreux polluants circulant au sein du réseau d'eau. Les raffineries, par exemple, dans lesquelles doivent être traités des hydrocarbures, des sulfures d'hydrogène ainsi que divers sels, font partie de ce type d'industries. Dans le même cas, on peut aussi nommer les industries textiles, agro-alimentaires ou métallurgiques. De par leur diversité, ces polluants sont difficiles à traiter et dans le contexte environnemental actuel, il est pourtant nécessaire de minimiser le rejet d'effluents pollués, la consommation d'eau et/ou le débit d'eau régénéré. Le problème qui en résulte est de type multiobjectif avec plusieurs critères antagonistes et qui, typiquement, peut être étudié grâce à la méthode mise en œuvre dans le chapitre précédent. Très peu de travaux rapportent une approche multicritère de ce type de réseau malgré son importance.

La formulation du problème d'allocation d'un réseau multipolluant diffère de celle d'un réseau n'incluant qu'un seul polluant. En effet, les simplifications précédemment effectuées doivent être revues ce qui entraîne une modification de la programmation mathématique. De par leur complexité, ces réseaux ne peuvent être optimisés à l'aide de techniques graphiques qui sont restreintes à l'étude des réseaux monopolluants (Savulescu et al., 2005a). Ainsi, dans les travaux antérieurs, c'est le plus souvent grâce à des programmations de type non linéaires (NLP ou MINLP) que ces réseaux sont optimisés (Bagajewicz et al., 2002 ; Feng et al., 2008).

Dans cette partie, trois exemples d'industries extraits d'études antérieures sont étudiés. Le premier est un réseau provenant d'une étude de Wang et Smith (1994). Les deux autres exemples ont été précédemment étudiés par Gunaratnam et al. (2005) et Feng et al. (2008). Ce sont des réseaux contenant un grand nombre de variables car constitués de trois polluants, cinq procédés et d'une ou plusieurs unités de régénération. Chacun d'entre eux fait ainsi l'objet d'une procédure d'aide à la décision afin de choisir le meilleur optimal vis-à-vis de plusieurs critères.

## 1. Formulation du problème d'allocation d'un réseau multipolluant

Dans la première partie du chapitre précédent, la formulation non linéaire présentée était celle du cas général. Elle s'applique à tous les réseaux industriels cependant, elle comporte certaines difficultés quant à l'initialisation des procédures d'optimisation non linéaires, d'où la linéarisation dans le cas monopolluant. La différence la plus importante entre un réseau monopolluant, et un autre qui en contient plusieurs se situe au niveau des contraintes sur les concentrations en sortie de chaque procédé. Lorsqu'un seul polluant circule dans le réseau, l'équation (12) du chapitre précédent s'écrit sous la forme d'une égalité car c'est la concentration du polluant concerné qui est limitante et qui se trouve par conséquent sur la borne maximale autorisée. D'où la simplification effectuée pour une résolution MILP :

$$\text{Si } wp_1^{j \rightarrow k} = 0, \text{ alors } wp_i^{j \rightarrow k} = 0 \quad (1)$$

$$\text{Devient :} \quad 0 \leq wp_2^{j \rightarrow k} \leq wp_1^{j \rightarrow k} \times A \quad (2)$$

$$wp_{i>1}^{j \rightarrow k} - C \max_j^s \times wp_1^{j \rightarrow k} = wpr_{i>1}^{j \rightarrow m} - C \max_j^s \times wpr_1^{j \rightarrow m} = wd_{i>1}^j - C \max_j^s \times wd_1^j \quad (3)$$

Lorsque l'on passe dans un système avec plusieurs polluants, un seul des polluants doit avoir sa concentration sur la borne supérieure de sortie des procédés et c'est alors lui le polluant limitant. Les autres peuvent avoir effectivement des concentrations inférieures ou égales à la borne maximale. Il en revient à ce que l'équation (3) soit effective pour le polluant  $i$  limitant mais pas pour les autres où là, une inégalité doit impérativement intervenir. Pour les autres polluants, ceux dont les concentrations ne sont pas forcément sur les bornes maximales, si l'équation (3) est vérifiée, l'équation (1) n'a plus aucun sens. La technique de linéarisation établie n'est alors plus valable dans ce cas là.

Ainsi, le problème non linéaire énoncé dans la première partie du chapitre précédent doit être reprise. Dans ce cas, ce sont des débits totaux qui sont utilisés et non des débits partiels et les contraintes peuvent alors être exprimées sous forme d'inégalités.

$$Cp_{j,i}^e \leq C \max_{j,i}^e \quad (4)$$

$$Cp_{j,i}^s \leq C \max_{j,i}^s \quad (5)$$

$$Cr_{m,i}^s \leq Cr \max_{m,i}^s \quad (6)$$



## 2. Résolution du problème multiobjectif

Le logiciel GAMS est utilisé pour optimiser les différents réseaux. Le projet COIN-OR (Computational Infrastructure for Operations Research) (Linderoth et Ralphs, 2005) implémenté dans GAMS vise à étendre et à rendre plus accessible l'utilisation de logiciels parfois très lourds. COIN-IPOPT (Wächter and Biegler, 2006), acronyme d'Interior Point OPTimizer, est un logiciel permettant de résoudre les optimisations non linéaires des systèmes continus, il est écrit en Fortran et C. Il implémente la Méthode du point intérieur et utilise des recherches linéaires basées sur des méthodes de filtre (Fletcher et al., 2000). Il ne nécessite pas une méthode d'initialisation trop coûteuse comme la majorité des autres solveurs. De ce fait, ce solveur est utilisé pour résoudre le problème NLP. Tandis que le solveur COIN-BONMIN 0.9 (Basic Open-source Nonlinear Mixed Integer programming) est employé lorsque des variables binaires sont introduites, ce qui transforme alors le problème en un problème de type MINLP (Bonami et al., 2008).

En ce qui concerne la résolution du problème multiobjectif, la procédure est comparable à celle d'un réseau monopolluant. La méthode inspirée de la stratégie epsilon-contraainte utilisée permet de minimiser les 3 objectifs :

- La consommation d'eau fraîche ( $F_1$ ).
- Le débit d'eau régénérée ( $F_2$ ).
- Le nombre de connexions dans le réseau ( $F_3$ ).

De façon analogue à l'étude réalisée pour les systèmes monopolluants, des optimisations bi-critères sont réalisées pour différentes valeurs du nombre de connexions. Ceci permet de tracer des fronts de Pareto mettant en évidence les solutions possibles pour l'utilisateur concerné. Le but de la linéarisation du problème pour un système monopolluant est de ne pas avoir recours à une méthode d'initialisation difficile à mettre en œuvre ; une méthode a cependant été mise en place de façon à simplifier cette étape. En effet dans GAMS, il est possible de traiter plusieurs problèmes au sein du même programme, ce qui permet d'initialiser le problème global à l'aide d'un « sous-problème » qui ne prend pas en compte toutes les contraintes. La procédure est illustrée par la figure III-1 dans laquelle les

valeurs sont données à titre d'illustration mais ne reflètent pas celles qui sont exposées dans la partie résultats.

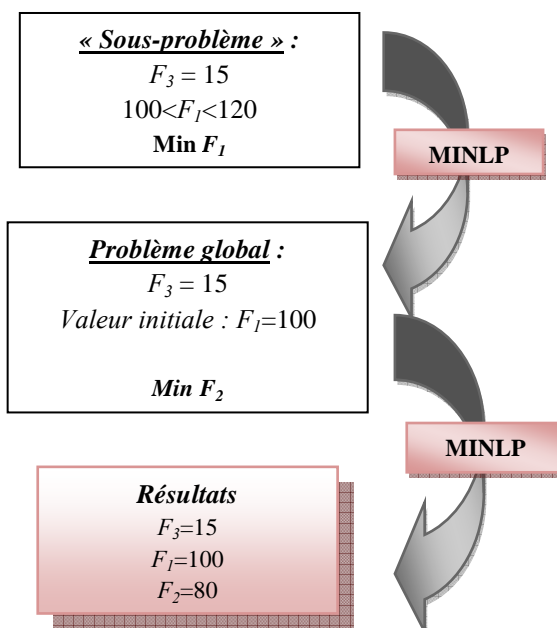


Figure III-1. Procédure d'initialisation du MINLP sous GAMS

Le sous-problème est constitué du problème complet mais sa résolution consiste à fixer deux bornes sur le critère  $F_1$  et à le minimiser sans se préoccuper de  $F_2$ . Avant de déterminer les bornes de  $F_1$ , il est nécessaire de réaliser des optimisations monocritères de façon à obtenir l'espace dans lequel  $F_1$  varie :  $[F_{1min} ; F_{1max}]$ . C'est ensuite cet intervalle qui est découpé en fourchettes d'espace constant et qui déterminent les bornes des différentes optimisations. Ceci revient à fixer  $F_1$  à la valeur minimale de la fourchette choisie et c'est cette valeur que GAMS utilise pour initialiser le problème global et minimiser  $F_2$ . Pour résoudre ce dernier il prend donc  $F_1$  à sa valeur minimale pour l'intervalle choisi précédemment et il minimise  $F_2$ . Toutes ces étapes sont réalisées avec  $F_3$  fixé pour résoudre le problème multiobjectif comme dans le chapitre précédent.

### 3. Comparaison des réseaux multipolluants vs monopolluants

Avant d'étudier les réseaux multipolluants dans leur ensemble, une étude préliminaire est réalisée. Le principal objectif de cette partie porte sur le choix de la démarche: est-il plus efficace de traiter un réseau multipolluant en programmation linéaire LP en séparant chacun des polluants, ou mieux vaut-il regrouper les polluants et étudier le réseau en programmation non linéaire NLP? Le réseau considéré à titre d'exemple est constitué de 5 procédés, 3

polluants et une unité de régénération. La figure III-2 regroupe les résultats des différentes optimisations. Les 3 droites avec diamants, carrés et triangles représentent les résultats des LP attribués à chacun des polluants dans leur ordre respectif, tandis que la courbe symbolisée par les cercles est le résultat du problème NLP multipolluant. Les symboles pleins montrent les résultats des LP/NLP et les symboles vides sont les résultats des MILP/MINLP dans chacun des cas pour un nombre de connexions contraint à son minimum, soit 11 connexions.

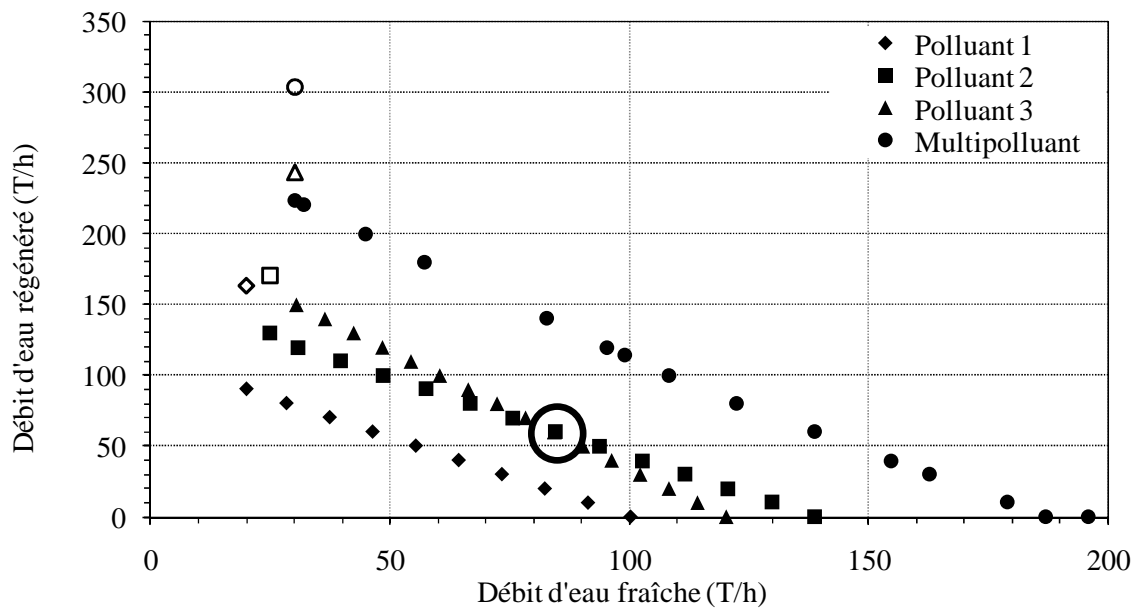


Figure III-2. Résultats des optimisations LP (monopolluant) vs NLP (multipolluant)

La première tendance notable et à la fois attendue, est que les 3 LP mènent à des droites tout comme le NLP. Cela dit, elles ne sont pas parallèles entre elles et se situent à des ordres de grandeur des débits plus faibles. Cela s'explique très bien car en monopolluant, le système est moins contraint, donc le réseau peut atteindre de faibles consommations d'eau. Plusieurs observations au sujet de ces courbes peuvent être faites :

- La courbe du polluant 1 (diamants) est la plus basse. Ceci montre que ce polluant n'est à aucun moment le polluant limitant puisque lui tout seul peut atteindre un débit d'eau fraîche minimum de 20 T/h alors qu'il est de 30 T/h pour le réseau multipolluant. De même, lorsque le débit d'eau régénéré est nul, l'eau fraîche qui entre dans le réseau peut avoir un débit de 100.3 T/h, alors que cette valeur était à 189.9 T/h dans le système multipolluant.

- Les courbes des polluants 2 et 3 (respectivement carrés et triangles) se croisent (cf. cercle noir sur la figure 2). Ceci met en évidence l'action du polluant limitant pour différentes valeurs des débits d'eau. Ainsi, pour un débit d'eau fraîche allant jusqu'à 80 T/h, c'est le polluant 3 qui est limitant, et implique que la consommation d'eau fraîche du réseau ne peut être inférieure à 30 T/h. En revanche, pour des débits d'eau fraîche au-delà de 80 T/h, c'est le polluant 2 qui devient limitant et qui conditionne le réseau global.
- Il est intéressant de constater qu'en additionnant les 3 LP séparés, on obtient des valeurs de débits plus élevées pour le minimum d'eau régénérée (90+130+150) que dans le cas multipolluant (223.4). En ce qui concerne les MILP vs MINLP, il faut s'intéresser aux symboles vides. Pour des réseaux à 11 connexions, voici leurs valeurs qui sont regroupées dans le tableau III-1.

		<i>Eau fraîche</i>	<i>Eau régénérée</i>
		<i>(T/h)</i>	<i>(T/h)</i>
<b>MINLP</b>	<b>Multipolluant</b>	30	303.9
<b>MILP</b>	<b>Polluant 1</b>	20	163.3
	<b>Polluant 2</b>	25	170.8
	<b>Polluant 3</b>	30	243.5

**Tableau III-1. Valeurs des débits d'eau pour les résolutions de type MILP et MINLP.**

Ces valeurs montrent bien qu'en monopolluant MILP on obtient des valeurs plus importantes lorsque l'on additionne les résultats qu'en MINLP multipolluant. Il est important de préciser que construire une courbe en MINLP est très long, car les codes informatiques sont plus complexes. Les temps de calcul sont donc importants mais finalement les débits d'eau obtenus sont meilleurs. A titre indicatif, pour un même réseau, le rapport des temps de calcul NLP/LP et MINLP/MILP valent respectivement 2/0.001 (2000) et 5/0.006 (840). Ces résultats préliminaires renforcent l'intérêt d'implémenter une procédure multiobjectif de type MINLP de façon à traiter le problème multipolluant dans sa globalité et non comme une juxtaposition de problèmes monopolluants.

## 4. Etude de différents exemples

Dans cette partie, trois exemples différents issus d'études antérieures sont traités dans le but de comparer les résultats obtenus avec ceux proposés dans la littérature. Ils ont été choisis de façon à augmenter la complexité progressivement au fil du texte.

### 4.1 Réseau extrait de Wang et Smith (1994)

Cet exemple a été choisi pour sa simplicité car il permet de valider la méthode en retrouvant les résultats obtenus dans les études antérieures. Il a donc été étudié grâce à une optimisation biobjectif, à l'aide d'une procédure NLP. Les variables binaires n'interviennent pas dans ce cas là car  $F_3$  n'est pas considéré, seuls les deux objectifs  $F_1$  et  $F_2$  sont pris en compte (le débit d'eau fraîche en T/h et le débit d'eau régénérée en T/h).

Le réseau est composé de deux procédés, une unité de régénération et deux polluants. Le réseau est celui d'une raffinerie où les deux polluants sont des hydrocarbures et des solides en suspension. L'exemple NLP comporte 26 variables, 19 contraintes égalité et 4 contraintes inégalité en sortie de chacun des procédés pour les deux polluants. Les valeurs des paramètres sont regroupées dans le tableau III-2.

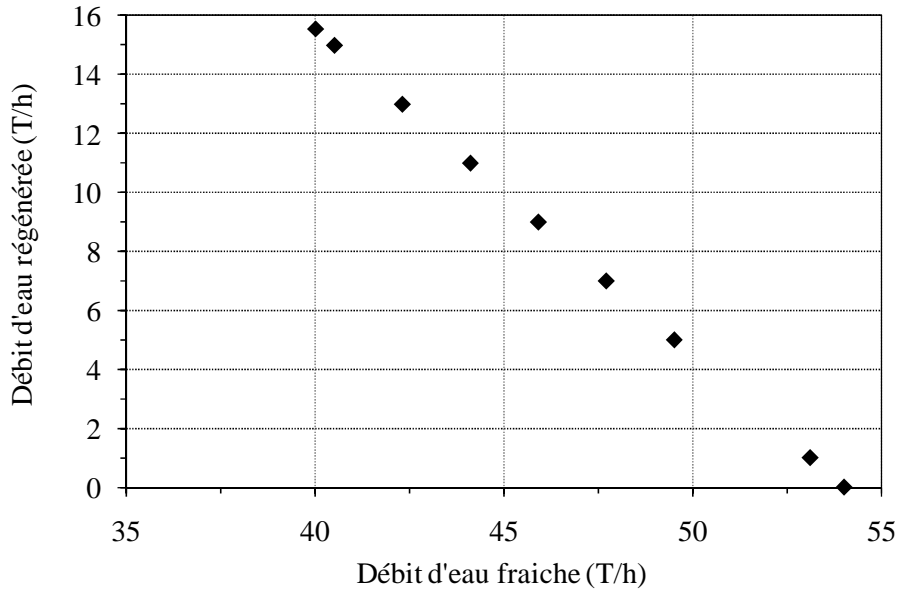
<i>Procédé</i>	<i>Polluant</i>	$C_{\max_j^e}$ (ppm)	$C_{\max_j^s}$ (ppm)	<i>Charge en polluant générée par j (g/h)</i>
1	1	0	100	4000
	2	25	75	2000
2	1	80	240	5600
	2	30	90	2100

Tableau III-2. Paramètres du réseau de Wang et Smith (1994)

Ce sont les valeurs des concentrations qui sont fixées en sortie de l'unité de régénération et non les rendements. Le polluant 1 sort de l'unité avec une concentration de 50 ppm et le deuxième avec une concentration de 5 ppm.

Les résultats obtenus sont reportés sur la figure III-3 et sont en accord avec ceux de Wang et Smith (1994), à savoir un débit minimal d'eau fraîche de 40 T/h. Pour cette valeur de 40 T/h d'eau fraîche consommée, le débit d'eau régénérée correspondant vaut 15.8 T/h. La limite inférieure pour le débit d'eau fraîche est située à 40 T/h et pour l'eau régénérée à 0 T/h

ce qui représente un cas inintéressant dans la pratique puisqu'il implique qu'aucune unité de régénération n'est introduite au réseau, ce qui ne correspond pas au réseau étudié.



**Figure III-3. Front de Pareto obtenu pour le 1<sup>er</sup> exemple en NLP.**

On observe que les points s'alignent sur une droite d'équation  $y = -1.111x + 60$  avec un coefficient de corrélation de 1. Pour le problème biobjectif, l'utilisateur aura donc à faire un choix parmi les points de cette droite qui représentent tous des solutions réalisables pour le réseau considéré. Ce résultat coïncide avec les travaux de Feng et al. (2007) qui montrent que le débit d'eau fraîche et le débit d'eau régénérée sont liées par une relation linéaire s'exprimant sous cette forme :

$$F_2 = A - B \times F_1 \quad (7)$$

Avec A et B étant des constantes dépendantes des concentrations maximales et de la charge polluante.

#### **4.2 Réseau de Feng et al. (2008)**

Le réseau suivant est plus complexe et est issu d'une étude de Feng et al. (2008). La principale différence est qu'il comporte trois unités de régénération au lieu d'une seule. Chacune d'elle traite les trois polluants avec une efficacité caractéristique. Ainsi, il s'agit des rendements qui sont fixés et non des concentrations en sortie de chacune d'entre elles. Cela

change simplement une contrainte dans le programme. Au total, cinq procédés, trois polluants et trois unités de régénération sont mises en jeu dans ce réseau dont les paramètres sont donnés dans les tableaux ci-dessous (Tableaux III-3 et III-4).

<i>Procédé</i>	<i>Polluant</i>	$C \max_j^e$ (ppm)	$C \max_j^s$ (ppm)	$M_i^j$ (g/h)
<b>1</b>	1	0	15	750
	2	0	400	20000
	3	0	35	1750
<b>2</b>	1	20	120	3400
	2	300	12500	414800
	3	45	180	4590
<b>3</b>	1	120	220	5600
	2	20	45	1400
	3	200	9500	520800
<b>4</b>	1	0	20	160
	2	0	60	480
	3	0	20	160
<b>5</b>	1	50	150	800
	2	400	8000	60800
	3	60	120	480

**Tableau III-3. Paramètres fixés pour le réseau d'eau**

<i>Unités de régénération</i>	<i>Rendements</i>		
	<b>Polluant 1</b>	<b>Polluant 2</b>	<b>Polluant 3</b>
1	0	0.999	0
2	0.7	0.9	0.98
3	0.95	0	0.5

**Tableau III-4. Rendements des unités de régénération pour chacun des polluants.**

A l'origine, cet exemple provient d'une étude de Gunaratnam et al. (2005) et représente un problème simplifié d'une raffinerie. Les trois polluants sont respectivement des hydrocarbures, des sulfures d'hydrogène ainsi que des solides en suspension. Pour traiter l'eau et ôter les polluants, les unités de régénération utilisées sont : une colonne de distillation vapeur, une unité de traitement biologique et un séparateur décanteur longitudinal (appelé séparateur « API »). Les cinq procédés sont associés à une opération en particulier : distillation vapeur, hydrodésulfurisation, désalinateur et distillation sous-vide. Enfin, il existe des limites fixées pour les concentrations de chacun de ces polluants dans les égouts :

hydrocarbures (HC), 20 ppm ; sulfure d'hydrogène (H<sub>2</sub>S), 5 ppm ; solides en suspension (SS), 100 ppm. Elles sont ajoutées au programme sous forme de contraintes inégalités.

Le programme NLP correspondant à ce réseau comporte 120 variables et 97 contraintes. Les résultats de l'optimisation bicritère non linéaire sont présentés sur la figure III-4.

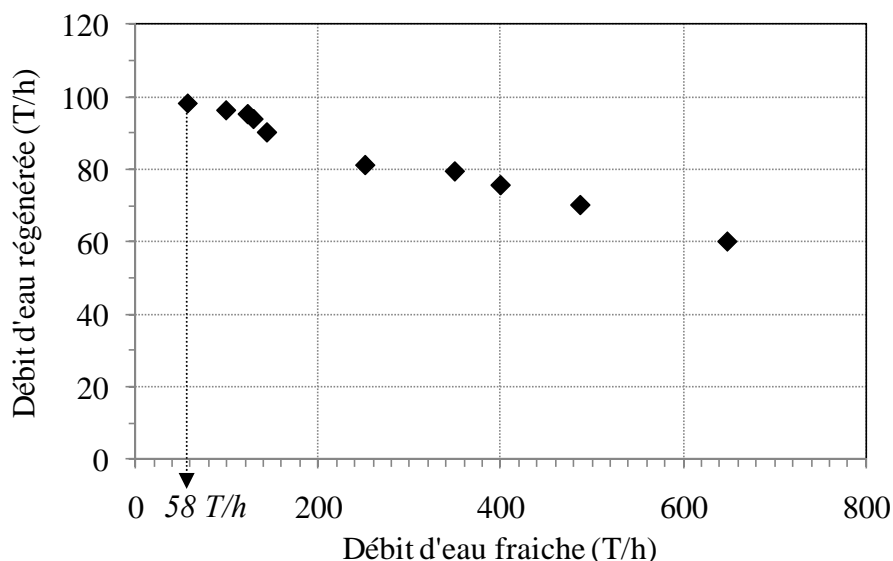


Figure III-4. Résultats du NLP pour le réseau d'eau considéré.

Plusieurs observations sont à noter :

- Contrairement au premier réseau traité, les points ne s'alignent pas sur une droite ; la figure III-4 présente toutes les solutions possibles.
- Le débit minimal d'eau fraîche obtenu est le même que celui de Gunaratnam et al. (2005) et de Feng et al. (2008), soit 58 T/h. En revanche, le débit d'eau régénéré associé est ici de 99.4 T/h, soit une valeur nettement plus faible que celle obtenue lors des précédentes études (164.15 T/h).

Dans la première partie du chapitre un point a été fait concernant le fait qu'en multipolluants, le programme doit forcément devenir non linéaire en raison des concentrations en sortie de chacun des procédés. Le polluant limitant possède sa concentration sur la borne de sortie des différents procédés tandis que les autres ont une concentration inférieure à la borne maximale. Dans ce cas-là, les données montrent que ces faits sont vérifiés pour les quatre premiers procédés mais pas pour le cinquième. Au niveau du procédé 5, les résultats



montrent qu'aucun des trois polluants n'a une concentration de sortie égalant la borne maximale. Cependant, un des trois, le polluant 2 qui était limitant au niveau des quatre autres procédés possède une concentration égale à la borne d'entrée du procédé. On se retrouve ainsi, face à un problème où l'un des polluants est limitant sur la borne d'entrée et non sur la borne de sortie.

### 4.3 3<sup>ème</sup> étude : réseau de Feng et al. (2008)

#### 4.3.1 Présentation de l'exemple

Cet exemple est issu de l'étude de Feng et al. (2008). Il permet d'approfondir l'optimisation simultanée de trois objectifs. Pour ce réseau, il est donc nécessaire de passer en MINLP afin d'introduire le troisième objectif qui représente la somme du nombre d'interconnexions et est représenté par des variables binaires  $y$ .

Le réseau contient cinq procédés, trois polluants et une unité de régénération traitant l'eau avec une concentration de sortie fixe pour chacun des trois polluants. Le problème comporte 145 variables continues déclarées positives et 36 variables binaires pour les interconnexions. Les paramètres fixes sont regroupés dans le tableau III-5.

<i>Procédé</i>	<i>Polluant</i>	$C \max_j^e$ (ppm)	$C \max_j^s$ (ppm)	$M_1^j$ (g/h)
1	1	0	50	1000
	2	0	100	2500
	3	0	50	1500
2	1	10	100	5000
	2	30	300	20000
	3	40	600	5000
3	1	20	200	5000
	2	50	400	15000
	3	50	100	10000
4	1	50	600	20000
	2	110	450	15000
	3	200	400	10000
5	1	500	1100	30000
	2	300	3500	15000
	3	600	2500	25000

Tableau III-5. Paramètres du réseau de Feng et al. (2008)

Les concentrations en sortie de l'unité de régénération pour les polluants sont respectivement : 10, 30 et 40 ppm.

#### 4.3.2 *Optimisations mono et bicritères*

Avant d'effectuer les optimisations multicritères, il est important de cibler les valeurs extrêmes en optimisant le problème selon un seul objectif. C'est ce que représentent les résultats du tableau III-6, où le critère optimisé est noté en gras. Chaque ligne du tableau présente ainsi trois valeurs : celle du critère optimisé (en gras) et celles des deux autres critères laissés libres.

	<i>Nombre de connexions</i>	<i>Débit d'eau fraîche</i>	<i>Débit d'eau régénéré</i>
Nombre de connexions	<b>11</b>	122	322
Débit d'eau fraîche	40	<b>30</b>	223
Débit d'eau régénéré	40	189	<b>0</b>

**Tableau III-6. Résultats des optimisations monocritères.**

D'après ces résultats, le nombre minimal de connexions possible est de 11, alors qu'il vaut 40 lorsque ce critère est laissé libre. Le débit minimal d'eau fraîche pouvant alimenter le réseau est quant à lui de 30 T/h, ce qui correspond à la valeur donnée par Feng et al. (2008). Enfin, le débit minimal d'eau régénérée est nul. Le réseau correspondant ne représente toutefois qu'une solution théorique, sans réel intérêt d'un point de vue industriel puisqu'il n'inclut pas d'unité de régénération.

Une fois les optimisations monocritères réalisées, les objectifs sont ensuite minimisés deux par deux. Ainsi, les résultats montrent que le débit d'eau fraîche minimal est de 30 T/h et ce, pour chaque nombre de connexions, même lorsque ce dernier est aussi à son minimum (11). Les résultats pour le couple [débit d'eau régénéré ; nombre de connexions] sont reportés sur la figure III-5. Plus le débit d'eau régénéré augmente et plus le nombre de connexions diminue. C'est donc pour un débit de 307 T/h que 11 connexions sont présentes dans le réseau. C'est à partir de 15 connexions que le débit minimum d'eau régénérée peut être atteint, cela signifie que si le nombre de connexions est inférieur à 15 le minimum du débit d'eau régénérée ne peut être atteint.

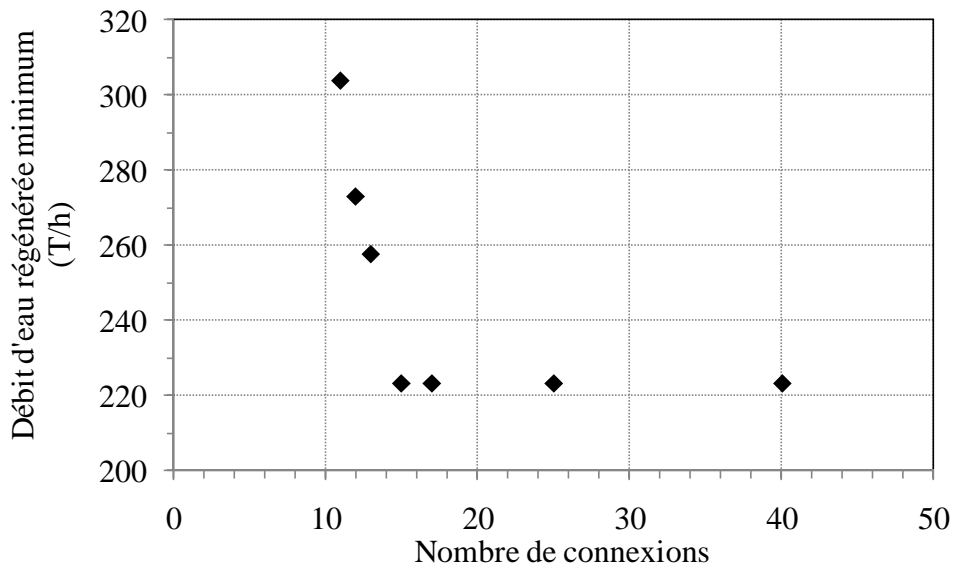


Figure III-5. Evolution du nombre de connexions en fonction du débit d'eau régénérée.

#### 4.3.3 Optimisations multicritères

Une fois que les valeurs extrêmes sont trouvées, l'optimisation selon les trois objectifs peut être réalisée. Le nombre de connexions varie entre 11 et 40, le débit d'eau fraîche est supérieur à 30T/h et celui de l'eau régénérée sera simplement positif. La figure 6 illustre les résultats de l'optimisation tricritère sur un graphique 3D, dans lequel chacun des axes représente l'un des trois objectifs.

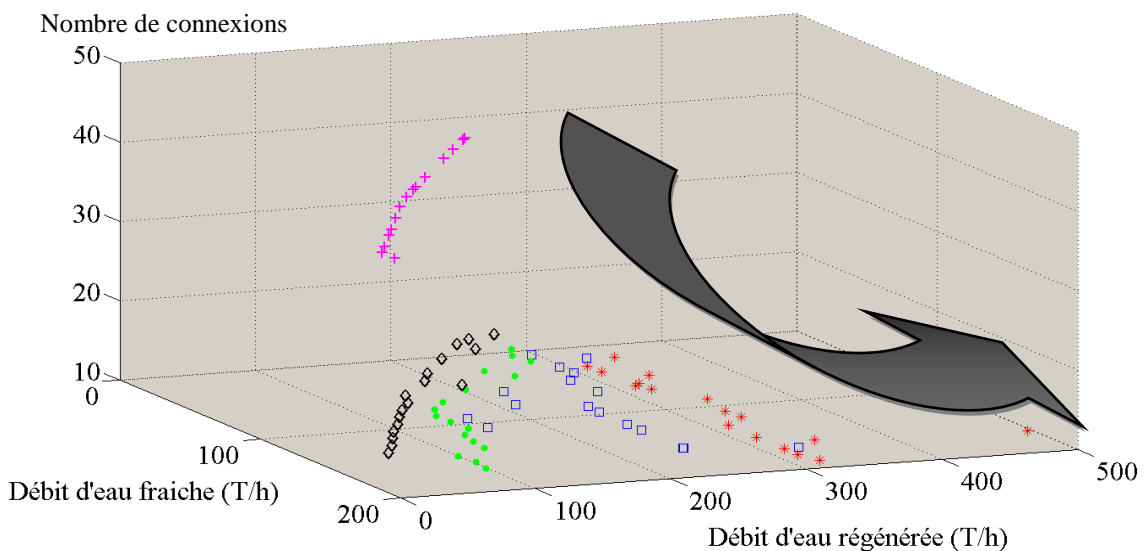
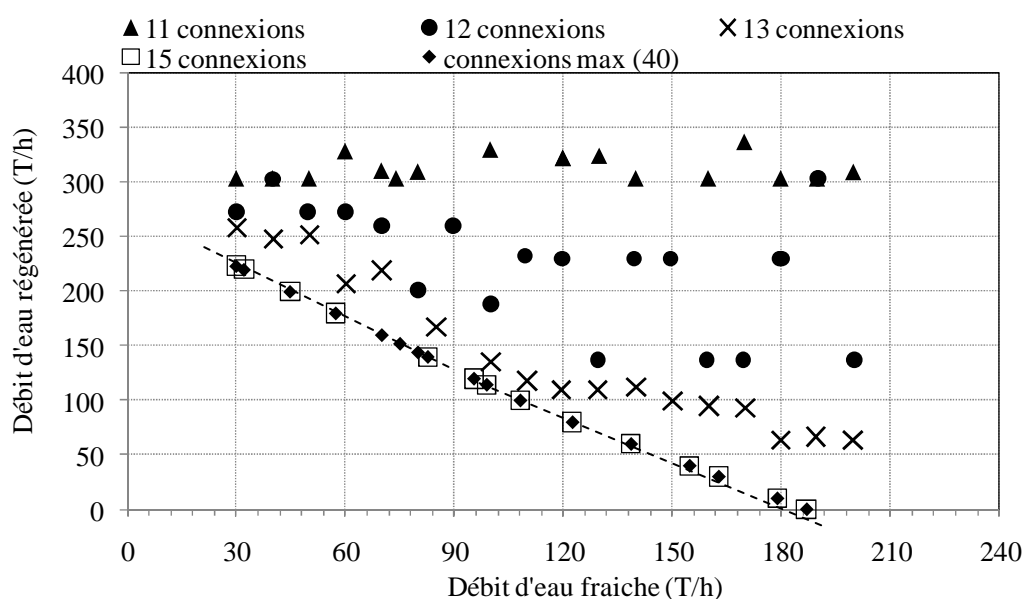


Figure III-6. Représentation 3D des résultats de l'optimisation tricritère

Bien que les représentations en trois dimensions soient toujours assez difficiles à lire, la flèche située sur le graphique indique la tendance globale des résultats : plus le nombre de connexions dans le réseau est limité, plus les débits d'eau impliqués sont importants. Dans les graphiques qui suivent c'est donc le nombre de connexions qui paramètre le problème, d'où l'apparition de graphes 2D où le débit d'eau régénérée est représenté en fonction du débit d'eau fraîche.

La figure III-7 illustre tous les résultats obtenus lors de l'optimisation multiobjectif, qu'ils soient dominés ou non ; ce ne sont donc pas les fronts de Pareto qui sont représentés.



**Figure III-7. Résultats (dominés et non dominés) des optimisations bi-critères paramétrées par le nombre de connexions.**

- **Lorsque le nombre de connexions est au maximum (40) :** les points représentent les résultats de l'optimisation NLP. En effet, le nombre de connexions étant laissé libre (les variables binaires sont enlevées) le problème est ramené à une optimisation bi-critère. Dans cet exemple, deux segments représentés sur la figure par des droites en pointillés sont obtenus et tous les points situés sur ces segments (de pentes différentes) représentent des solutions faisables. Le premier débute au point (30, 223.4) et arrive aux environs des coordonnées (82, 140), tandis que le deuxième reprend le relais au niveau de ce deuxième point et arrive à (189.6, 0). Ces deux segments de pentes différentes correspondent exactement à ce qui avait été préalablement observé sur la

figure III-2. De 30 à 82 T/h d'eau fraîche consommée, c'est le polluant trois qui est limitant et c'est donc lui qui conditionne la pente de la droite. Lorsque plus de 82 T/h d'eau fraîche sont consommées le polluant deux devient le limitant. Ce sont des réseaux complexes car ils comportent 40 connexions et ils seront par conséquent coûteux lors de l'installation même si des débits d'eau faibles sont atteints.

- **Lorsque le nombre de connexions est minimal (11):** ces points sont le résultat de l'optimisation MINLP. Le système est par conséquent contraint au maximum. Les débits d'eau sont beaucoup plus élevés. Pour obtenir une entrée d'eau fraîche de 30 T/h, le débit d'eau régénérée doit passer à 309.9 T/h, alors qu'il peut descendre à 223.4 T/h lorsque le système est plus libre. De plus, avec un réseau simplifié au maximum, composé de 11 connexions, le débit d'eau régénérée ne pourra en aucun cas descendre en dessous de 309.9 T/h, impliquant un recyclage très important. Ce qui risque de coûter relativement cher à l'utilisateur. D'un point de vue environnemental, il peut cependant atteindre le débit d'eau fraîche minimum qui est de 30 T/h, ce qui peut présenter un intérêt si la ressource est particulièrement limitée.

Les deux possibilités venant d'être étudiées représentent des cas extrêmes où pour chacun des deux, un des trois critères est à sa valeur maximale. Dans le premier cas, il s'agit du nombre de connexions et dans le second c'est l'eau régénérée qui est maximale. Il est important d'identifier des cas intermédiaires afin que les trois critères soient minimisés de façon simultanée.

- **Les réseaux comportant 12 connexions :** dans ce cas, le réseau comporte une connexion de plus par rapport au cas précédent. Les solutions obtenues sont intéressantes car les débits d'eau régénérée baissent pour un débit d'eau fraîche équivalent. Ainsi, pour un débit d'eau fraîche à 30 T/h, l'utilisateur pourra se permettre de descendre le débit d'eau régénérée à 276.2 T/h, avec un gain de près de 34 T/h. En revanche, lorsque davantage d'eau fraîche est utilisée dans le réseau, le débit d'eau régénérée diminue mais pas de façon linéaire comme en NLP. D'une manière générale, plus le débit d'eau fraîche augmente, plus le débit d'eau régénérée diminue. Pour un nombre de connexions maximal, tous les points situés sur la droite représentaient des solutions réalisables mais lorsque le système est plus contraint, le nombre de solutions diminue considérablement. Plus particulièrement, le nombre de

solutions non dominées diminue. Même si dans ce cas les débits d'eau sont faibles pour un nombre de connexions assez restreint, les valeurs des débits sont encore éloignées de la droite représentant le minimum.

- ***Lorsque le réseau comporte 13 connexions:*** dans ce cas, les mêmes conclusions que pour le cas précédent peuvent être tirées. Le réseau se complexifie et les débits d'eau diminuent sans atteindre les valeurs des débits minimum. C'est un cas intermédiaire typique avec un nombre limité de solutions mais intéressantes d'un point de vue pratique. Pour un débit d'eau fraîche de 30 T/h, le débit d'eau régénéré associé est de 257.8 T/h.
- ***Lorsque le réseau inclut 15 connexions :*** à première vue, cette série représente l'ensemble des solutions les mieux placées selon les trois objectifs. Par rapport aux débits, elle est située quasiment sur la droite des solutions associées au nombre maximal de connexions. Cela signifie que les réseaux atteignent des débits d'eau minimaux pour un nombre de connexions le plus faible possible. Une remarque importante est le fait que par rapport à la droite comportant les solutions avec un nombre de connexions maximum, le nombre de solutions est plus restreint dans ce cas.

#### 4.3.4 Aide à la décision

La figure III-8 est un sous-ensemble de la figure III-7 et comporte uniquement les points non dominés et met par conséquent en évidence les fronts de Pareto pour chaque nombre de connexions dans le réseau. Plus le nombre de connexions diminue, moins il existe de solutions. Le cas le plus flagrant est pour un nombre de connexions égal à 11, où il ne reste plus qu'une seule solution aux coordonnées (30, 309.9).

Il existe donc une solution pour 11 connexions, 5 pour 12 connexions, 9 pour 13 connexions, une quinzaine pour 15 connexions, et enfin, une infinité pour 40 connexions. « Comment choisir la meilleure solution parmi les points des fronts de Pareto ? » est la question à laquelle l'on doit s'efforcer de répondre dans le cadre d'une procédure d'aide à la décision. En anglais, un tel problème est appelé MCDM pour Multiple Choice Decision Making et consiste à considérer globalement les trois critères. Aucune décision ne peut être prise sans prendre en compte l'un des trois. Deux outils d'aide à la décision sont ici étudiés et

comparés de façon à proposer une solution. Il s'agit de la méthode TOPSIS (Ren et al., 2007) ainsi que du nouvel indicateur économique, le CEG – coût Economique Global – (Boix et al., 2011) qui a été précédemment utilisé (cf. chapitre 2).

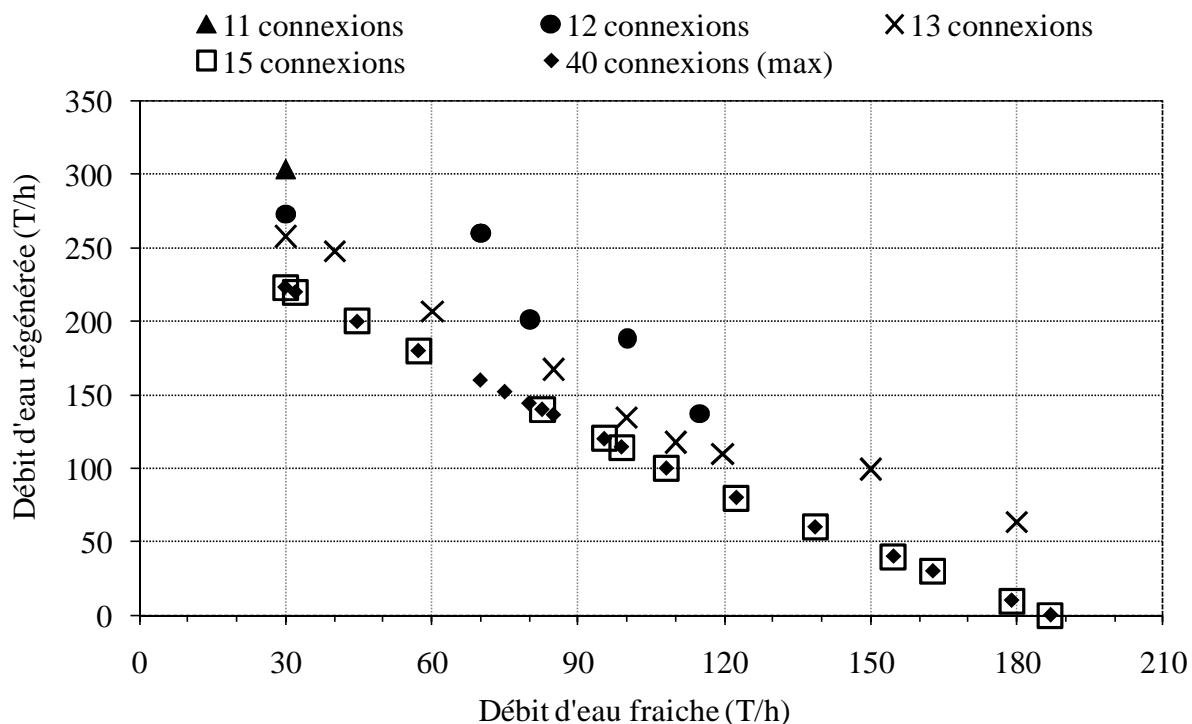


Figure III-8. Fronts de Pareto obtenus suite au tri des solutions globales.

### • Analyse TOPSIS

M-TOPSIS est une méthode d'évaluation synthétique basée sur le concept de la version originale TOPSIS (Ren et al., 2007). Dans cette approche, la distance entre chacun des points du front de Pareto et « le point optimisé idéal de référence » est calculée. Ce dernier est un point théorique où la valeur de chacun des objectifs est au minimum ; dans le cas présent bicritère, ce point est l'origine (0, 0). Par conséquent, ce programme calcule la distance entre chacune des solutions et l'origine, il classe ensuite chaque solution de façon croissante avec la distance. Le programme TOPSIS est implémenté grâce à la boîte à outils de MATLAB et assigne un rang à chacune des solutions vis-à-vis de plusieurs critères pondérés. Dans le cas présent, les trois objectifs considérés sont pris en compte avec le même poids (soit 1) ; les 30 premiers résultats de cette analyse sont donnés dans le tableau III-7.

<i>Débit d'eau fraîche (T/h)</i>	<i>Débit d'eau régénérée (T/h)</i>	<i>Nombre de connexions</i>	<i>Rang M- TOPSIS</i>
98.9	114.5	15	1
95.4	120	15	2
108.2	100	15	3
82.7	140	15	4
122.5	80	15	5
57.3	180	15	6
138.6	59.9	15	7
44.8	199.9	15	8
110.1	118	13	9
100	134.8	13	10
32.1	220	15	11
30	223.4	15	12
154.7	40	15	13
119.6	109.8	13	14
162.7	30	15	15
85	167.6	13	16
178.9	10	15	17
60.1	206.8	13	18
186.9	0	15	19
115	137.3	12	20
30.1	257.8	13	21
196	0	15	22
40.1	247.9	13	23
30	273.1	12	24
80.1	201.5	12	26
70.1	219.0	13	27
150.1	99.4	13	28
179.9	63.2	13	29
30	304	11	30

**Tableau III-7. Résultats de l'analyse M-TOPSIS**

Ces résultats mettent clairement en évidence le fait que les réseaux considérés comme optimaux selon les trois critères par l'analyse M-TOPSIS sont ceux qui comportent 15 interconnexions. En effet, ce sont les réseaux impliquant les débits d'eau les plus faibles. Cependant, il apparaît un inconvénient majeur à cette approche: celle-ci ne considère que très peu la complexité du réseau. Cela s'explique par la différence d'échelle entre les différents critères : pour le nombre de connexions, seulement 5 (de 11 à 15 la différence est 4) unités séparent les réseaux les mieux placés de ceux comportant plus de connexions. L'analyse privilégiera toujours les débits d'eau les plus faibles. Par conséquent, le seul réseau contenant 11 connexions arrive en 30<sup>ème</sup> position selon ce classement. Afin de remédier à cet inconvénient, le coût équivalent global (CEG, Boix et al., 2011) est utilisé par la suite.



• **Coût Equivalent Global (CEG)**

Pour évaluer le coût des réseaux, un nouvel indicateur économique est utilisé : le coût équivalent global (CEG), mesuré en débits d'eau équivalents, son expression a précédemment été évoquée dans le chapitre II. Pour rappel, il vaut :

$$CEG = F_1 + R + D \tag{8}$$

Avec  $R$  et  $D$  étant les contributions des débits d'eau régénérée et rejetée à l'égout, avec:

$$R = \alpha \times F_2 \quad \text{et} \quad D = \beta \times F_D \tag{9} \tag{10}$$

Avec  $F_2$ , le débit d'eau régénérée et  $F_D$ , le débit d'eau rejetée à l'égout.

Dans la précédente relation,  $\alpha$  et  $\beta$  sont respectivement liés au coût de régénération de l'eau et au coût post-traitement de l'eau envoyée à la décharge.  $\alpha$  dépend du type d'unité de régénération utilisée dans le réseau (Tableau 8) et  $\beta$  est égal à 5.625 (Bagajewicz et Faria, 2009).

<i>Type d'unité de régénération</i>	<i>Concentration post-régénération (ppm)</i>	<i><math>\alpha</math></i>
I	50	0.375
II	20	1.75
III	5	3.125

**Tableau III-8. Valeurs du paramètre  $\alpha$  en fonction de l'unité de régénération (Bagajewicz et Faria, 2009).**

Dans l'exemple étudié ici, les concentrations en sortie de l'unité de régénération sont 10, 30 et 40 ppm pour les polluants 1, 2 et 3 respectivement. Le meilleur compromis est ainsi de choisir une unité de régénération de type II correspondant le mieux aux valeurs fixées. Ces paramètres mènent ainsi à l'équation suivante:

$$CEG = 6.625 \times F_1 + 1.75 \times F_2 \tag{11}$$

Pour chaque réseau de la figure 8, le CEG correspondant est calculé et tracé en fonction du nombre de connexions associé (Figure III-9). Ainsi, pour chaque valeur du nombre de connexions, seule la solution contenue sur le front de Pareto et ayant le CEG minimum est tracée. Afin de montrer la stabilisation de la solution, le CEG minimal est également reporté pour 20 et 30 connexions. De cette façon, si le CEG et le nombre de

connexions sont considérés simultanément, le réseau optimal est celui incluant 15 connexions (cerclé sur la figure 7). Ce dernier implique une consommation d'eau fraîche de 30 T/h et une régénération de 223 T/h d'eau. Les réseaux placés à droite de ce point ne sont pas intéressants par rapport à celui-ci car pour la même valeur du CEG ils incluent plus de connexions.

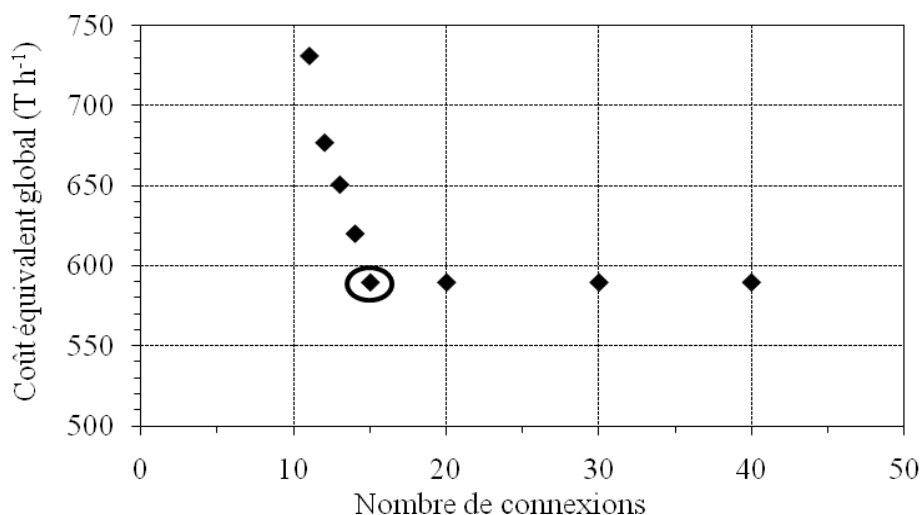


Figure III- 9. CEG minimal pour chaque nombre de connexions.

Selon l'analyse M-TOPSIS précédemment effectuée, ce réseau était classé 12<sup>ème</sup>. En termes de topologie et de consommation d'eau, c'est le réseau le plus avantageux. Il est dessiné sur la figure 10. La conception d'un tel schéma est intéressante d'un point de vue pratique car il n'implique pas de très petits débits d'eau. Dans l'étude de Feng et al. (2008), un réseau similaire est finalement proposé, ce-dernier possède un CEG similaire au réseau choisi ici mais possède un plus grand nombre de connexions (19) impliquant de faibles débits d'eau (< 2 T/h). Le CEG de ce réseau est d'environ 589 T/h alors que le CEG des autres réseaux consommant 30T/h d'eau fraîche vaut 650, 680 et 730 T/h pour 13, 12 et 11 connexions, respectivement. Ces réseaux arrivent en position 21, 24 et 30 du classement TOPSIS.

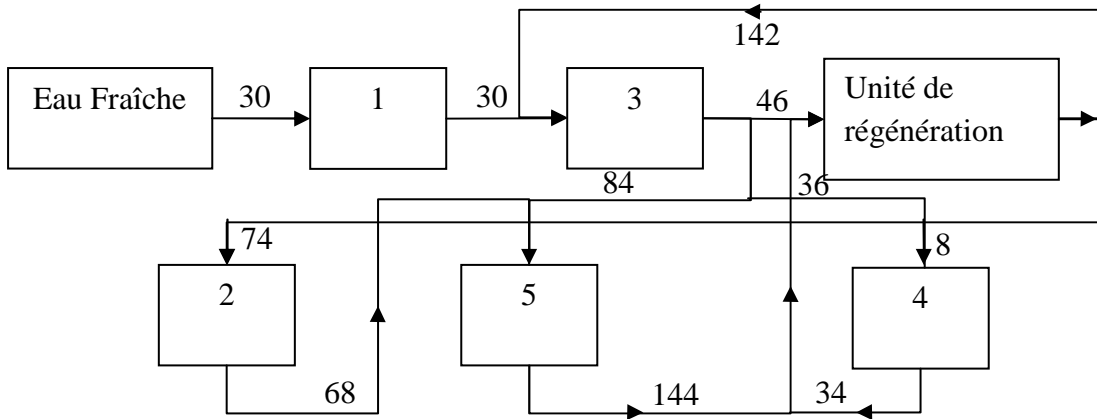


Figure III-8. Schéma du réseau optimal selon l'analyse CEG.

## 5. Conclusion

Ce chapitre a permis de mener à bien l'optimisation multiobjectif de différents types de réseaux. A l'aide d'une procédure MINLP, les réseaux d'eau multipolluants sont optimisés selon trois objectifs antagonistes. Les données nécessaires à cette approche sont, pour chaque réseau, le nombre de procédés, leurs concentrations maximales d'entrée et de sortie ainsi que la charge polluante qu'ils génèrent. Ensuite, le nombre d'unités de régénération doit être connu avec leur efficacité correspondant à chacun des polluants. Les objectifs considérés sont le débit d'eau fraîche à l'entrée du réseau (étroitement lié au critère environnemental), le débit d'eau régénérée (davantage lié au critère économique), ainsi que le nombre de connexions associé à la complexité topologique du réseau.

Une étude préliminaire a permis de conclure sur la nécessité de traiter ce type de réseaux en MINLP. En effet, cette méthode permet d'obtenir de meilleures solutions que les procédures de type MILP ou LP, pour lesquelles les polluants sont traités de façon séquentielle dans le réseau. Ainsi, la procédure MINLP implémentée à l'aide d'une stratégie  $\varepsilon$ -contrainte fournit un jeu de solutions optimales sous forme de fronts de Pareto. Pour le troisième réseau présenté dans ce chapitre, une méthodologie d'aide à la décision est mise en œuvre. Du point de vue du décideur, la solution proposée doit impérativement impliquer une consommation d'eau fraîche faible, des coûts réduits, et le réseau doit être topologiquement simple avec des débits d'eau significatifs. Ce problème est traité à l'aide de deux méthodes

différentes : la procédure de classement TOPSIS et par le biais de l'indicateur économique CEG. Ce dernier outil, combiné au nombre de connexions dans le réseau, se révèle être relativement puissant dans le sens où il permet d'obtenir la solution optimale en ne défavorisant aucun des trois objectifs par rapport à un autre.

---

---

*CHAPITRE IV – Optimisation de  
réseaux d'eau et de chaleur*

---

---

## Nomenclature du chapitre

L'eau est attribuée à l'indice  $i=1$  et le polluant à l'indice  $i=2$ .

$w p_i^{j \rightarrow k}$	débit circulant du procédé $j$ au procédé $k$ (T/h)
$w r_i^{m \rightarrow n}$	débit d'eau ou de polluant circulant de l'unité de régénération $m$ vers l'unité $n$ (T/h)
$w r p_i^{m \rightarrow j}$	débit d'eau ou de polluant circulant de l'unité de régénération $m$ au procédé $j$ (T/h)
$w p r_i^{j \rightarrow m}$	débit d'eau ou de polluant circulant du procédé $j$ à l'unité de régénération $m$ (T/h)
$w d_i^j$	débit d'eau ou de polluant circulant du procédé $j$ à la décharge (T/h)
$w r d_i^m$	débit d'eau ou de polluant circulant de l'unité de régénération $m$ à la décharge (T/h)
$w_i^j$	débit d'eau fraîche entrant dans le procédé $j$ (T/h)
$y p^{j \rightarrow k}$	variable binaire du courant reliant le procédé $j$ au procédé $k$
$M^j$	charge polluante générée par le procédé $j$ (g/h)
$C \max_j^s$	concentration maximale du polluant à la sortie du procédé $j$ (ppm)
$C \max_j^e$	concentration maximale du polluant à l'entrée du procédé $j$ (ppm)
$W e_i^j$	débit d'eau fixé pouvant entrer dans le procédé $j$ (T/h)
$T_w$	température de l'eau fraîche (°C)
$T p_j$	température de fonctionnement du procédé $j$ (°C)
$T r_m$	température de fonctionnement de l'unité de régénération $m$ (°C)
$T d$	température de l'eau rejetée à la décharge (°C)
$Q p_j$	flux énergétique nécessaire pour chauffer le procédé $j$ (énergie positive) (kW)
$Q n_j$	flux énergétique nécessaire pour refroidir le procédé $j$ (énergie négative) (kW)
$Q r p_m$	flux énergétique nécessaire pour chauffer l'unité de régénération $m$ (énergie positive) (kW)
$Q r n_m$	flux énergétique nécessaire pour refroidir l'unité de régénération $m$ (énergie négative) (kW)
$Q p d$	flux énergétique nécessaire pour chauffer l'eau rejetée à l'égout (énergie positive) (kW)
$Q n d$	flux énergétique nécessaire pour refroidir l'eau rejetée à l'égout (énergie négative) (kW)
$C_p$	capacité calorifique
$F c(i)$	débit calorifique du courant chaud $i$ (kW/h)
$F f(j)$	débit calorifique du courant froid $j$ (kW/h)
$t c(i, k)$	température du courant chaud $i$ pour une étape $k$ de la superstructure (°C)
$t c i n(i)$	température d'entrée du courant chaud $i$ (°C)
$t f i n(j)$	température d'entrée du courant froid $j$ (°C)

$tcout(i)$	température de sortie du courant chaud $i$ (°C)
$tfout(j)$	température de sortie du courant froid $j$ (°C)
$tucin$	température d'entrée de l'utilité chaude (vapeur) (°C)
$tufin$	température d'entrée de l'utilité froide (eau) (°C)
$tucout$	température de sortie de l'utilité chaude (vapeur) (°C)
$tufout$	température de sortie de l'utilité froide (eau) (°C)
$hc(i)$	coefficient de transfert de chaleur du courant chaud $i$ (kW/m <sup>2</sup> .°C)
$hf(j)$	coefficient de transfert de chaleur du courant froid $j$ (kW/m <sup>2</sup> .°C)
$huc$	coefficient de transfert de chaleur de l'utilité chaude (vapeur) (kW/m <sup>2</sup> .°C)
$huf$	coefficient de transfert de chaleur de l'utilité froide (eau) (kW/m <sup>2</sup> .°C)
$Qtot\_c(i)$	quantité de chaleur échangée pour le courant chaud $i$ (kW)
$Qtot\_f(j)$	quantité de chaleur échangée pour le courant froid $j$ (kW)
$tf(j,k)$	température du courant froid $j$ pour une étape $k$ de la superstructure (°C)
$q(i,j,k)$	énergie échangée entre le courant chaud $i$ et le courant froid $j$ (kW)
$qc(j)$	énergie échangée entre le courant chaud $i$ et l'utilité froide (kW)
$qf(i)$	énergie échangée entre le courant froid $j$ et l'utilité chaude (kW)
$dt(i,j,k)$	différence de température entre $i$ et $j$ pour une étape $k$ de la superstructure (°C)
$dtuf(i)$	différence de température entre $i$ et l'utilité froide (°C)
$dtuc(j)$	différence de température entre $j$ et l'utilité chaude (°C)
$A\_int(i,j,k)$	aire d'échange pour le couplage $i-j$ pour une étape $k$ de la superstructure (m <sup>2</sup> )
$A\_ucc(j)$	aire d'échange pour le couplage $Fj-Uc$ (m <sup>2</sup> )
$A\_uff(i)$	aire d'échange pour le couplage $Ci-Uf$ (m <sup>2</sup> )
$z(i,j,k)$	variable binaire concernant l'existence de l'échangeur $Ci-Fj$
$zuf(i)$	variable binaire concernant l'existence de l'échangeur $Ci$ -utilité froide
$zuc(j)$	variable binaire concernant l'existence de l'échangeur et $Fj$ -Utilité chaude
$tmapp$	température minimale d'approche (°C)
$U$	paramètre fixé à une grande valeur (c.a.d. supérieure à chaque débit massique)
$A$	aire de l'échangeur de chaleur (m <sup>2</sup> )
$F_1$	fonction-objectif 1 : consommation totale d'eau fraîche (T/h)
$F_2$	fonction-objectif 2 : débit total d'eau régénérée (T/h)
$F_3$	fonction-objectif 3 : nombre total d'interconnexions
$F_4$	fonction-objectif 4 : flux énergétique total nécessaire (kW)
$F_5$	fonction-objectif 5 : nombre d'échangeurs de chaleurs présents dans le réseau
$F_6$	fonction-objectif 6 : critère de coût
$F_D$	débit d'eau rejetée à la décharge (T/h)

L'eau et l'énergie sont très largement utilisées dans les industries et jouent un rôle important au sein du développement durable d'une société. Réduire simultanément les consommations d'énergie et d'eau fraîche dans une industrie constitue un but majeur. Récemment, de nombreux efforts ont été effectués dans ce domaine suite à l'augmentation significative du prix du pétrole, qui de plus, est prévu pour rester relativement élevé étant donnée la diminution des ressources primaires. Dans les industries, l'eau est habituellement utilisée afin de véhiculer la chaleur pour chauffer et/ou refroidir, ou comme moyen pour extraire les impuretés suivant les différents courants. Par exemple, au sein des raffineries, la vapeur d'eau est utilisée dans la séparation du brut sous vide ainsi que dans les opérations de cokéfaction, de raffinage catalytique ou encore lors de l'alkylation. Toutes ces opérations nécessitent ainsi une eau chauffée à une température donnée. Récemment, la conception des réseaux d'eau et de chaleur a été traitée de façon séquentielle avec l'optimisation de l'allocation du réseau d'eau dans un premier temps et ensuite celle du réseau de chaleur (Leewongtanawit et Kim, 2008). Cela ne garantit pas forcément de trouver les points optimaux car toutes les interactions entre les étapes ne sont pas réellement prises en compte.

Ce chapitre a pour but d'optimiser des réseaux d'eau et de chaleur selon plusieurs objectifs. En introduisant de nouveaux paramètres par rapport aux chapitres précédents, ainsi, le nombre de variables, de critères et la taille des problèmes va considérablement augmenter. Les différents réseaux traités dans ce chapitre seront optimisés via des programmations mathématiques de façon similaire à ce qui a été réalisé jusqu'ici. Deux façons d'aborder le problème de réseaux d'eau et de chaleur sont rencontrées dans la littérature. La première consiste à pratiquer une allocation du réseau, c'est-à-dire que les procédés sont assimilés à des boîtes noires et le but est de trouver tous les débits d'eau circulant dans le réseau. La seconde considère davantage le procédé et donne ainsi des informations sur les débits d'eau nécessaires au bon fonctionnement de ce dernier. Ces deux pratiques sont ainsi abordées dans ce chapitre et illustrées par différents exemples de la littérature. Enfin, des réseaux optimaux en termes énergétiques et environnementaux seront proposés à l'issue des phases d'optimisations dans chacun des cas présentés.



## 1. Allocation de réseaux d'eau et de chaleur

### 1.1 Formulation du problème

Un réseau contenant un certain nombre de procédés utilisant l'eau avec ou sans unités de traitement en fonction de l'exemple considéré est optimisé. De façon similaire à ce qui a été réalisé précédemment, les unités de procédé sont considérées comme des boîtes noires car leur mode de fonctionnement et leur rôle au sein du réseau reste toujours inconnu. Cependant un nouveau paramètre est introduit : la température de fonctionnement de chaque unité est imposée et par conséquent déterminée. L'énergie est fournie en entrée de chacun des procédés et de chacune des unités de régénération si elle est nécessaire. Cela signifie que lorsque les courants entrent dans un procédé donné, ils se mélangent avec leur concentration et leur température respectives, c'est après ce mélange qu'une énergie peut être fournie pour réchauffer ou refroidir en fonction des besoins du procédé (Figure IV-1).

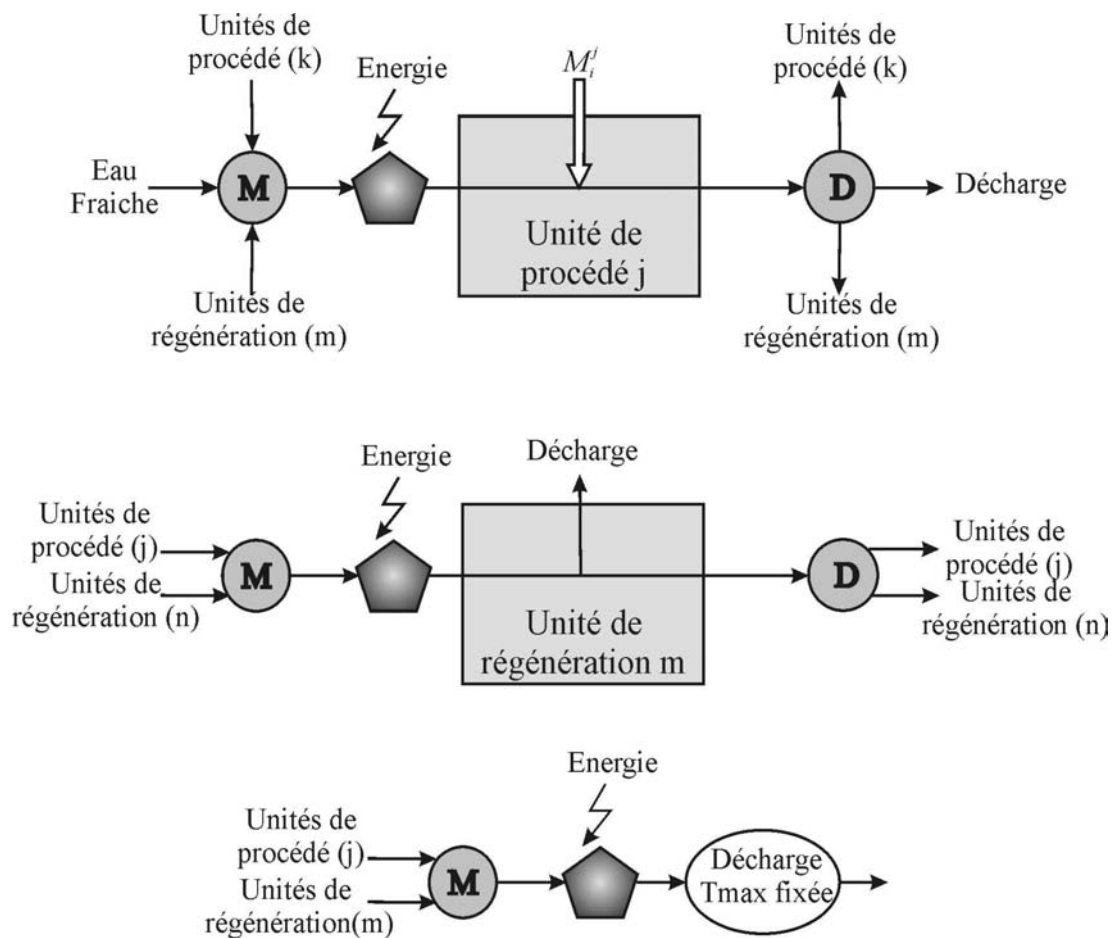


Figure IV-1. Superstructure générale d'un réseau

Les données connues pour chaque procédé sont : les concentrations d'entrée et de sortie maximales admises, la charge en polluant générée, la température de fonctionnement et parfois le débit maximal d'eau permettant à l'unité de fonctionner correctement. Pour chaque unité de régénération, la concentration de sortie est fixée ainsi que sa température. En fonction de chaque problème, ces données pourront être adaptées ou précisées. Enfin, pour terminer avec la définition de la superstructure, il est important d'ajouter que toutes les connexions entre les divers éléments sont possibles et autorisées dans le programme hormis l'auto-alimentation d'un procédé ou d'une unité de traitement.

L'introduction de la température nécessite l'ajout de nouvelles équations au sein du programme mathématique. Les mêmes équations que dans la partie 2 du chapitre 2 sont formulées de façon à obtenir un programme linéaire, d'autant que les réseaux traités ne contiennent qu'un seul polluant. Tous les bilans de masse et de débits sont ainsi conservés de même que les contraintes d'inégalité sur les concentrations d'entrée et de sortie.

Le bilan du flux énergétique pour un procédé j est donné par :

$$\left( w_1^j \times T_W + \sum_k w p_1^{k \rightarrow j} \times T p_k + \sum_m w r p_1^{m \rightarrow j} \times T r_m \right) + (Q p_j - Q n_j) / C_p = T p_j \times \left( \sum_k w p_1^{j \rightarrow k} + w d_1^j + \sum_m w p r_1^{j \rightarrow m} \right) \quad (1)$$

De même pour une unité de régénération m :

$$\left( \sum_j w p r_1^{j \rightarrow m} \times T p_j + \sum_n w r_1^{n \rightarrow m} \times T r_n \right) + (Q r p_m - Q r n_m) / C_p = T r_m \times \left( \sum_j w r p_1^{m \rightarrow j} + w r d_1^m + \sum_n w p_1^{m \rightarrow n} \right) \quad (2)$$

Le bilan du flux énergétique au niveau de la décharge est exprimé par :

$$\sum_j w d r_1^j \times T p_j + \sum_m w r d_1^m \times T r_m + (Q p d - Q n d) / C_p = T d \times \left( \sum_j w_1^j + \sum_m w r d_1^m \right) \quad (3)$$

Pour calculer le flux énergétique total, il suffit de prendre les valeurs absolues de chacun des termes  $Q$  et de les ajouter. Cette notation est utile car dans certains exemples plus concrets, il peut être important de ne considérer que l'énergie nécessaire pour chauffer et non celle pour refroidir car d'un point de vue économique, elle peut ne pas être assez significative. Le flux énergétique total obtenu sera exprimée en kW, comme cela a été fait dans la littérature.

Enfin, d'autres contraintes au problème sont ajoutées afin que le réseau soit simple et ne comporte pas d'aberrations en termes de mise en œuvre. Une limite inférieure est fixée pour les débits d'eau afin d'éviter de trop petites connexions (dont le diamètre est inférieur à un pouce soit 2.54 cm). Pour cette taille de tuyau, le débit d'eau circulant doit être supérieur à 2 T/h en considérant une vitesse de 1 m/s, vitesse considérée comme optimale d'un point de vue technico-économique dans l'industrie des procédés, tel que cela a précédemment été exposé au chapitre II :

$$\left(\varepsilon - wp_l^{j \rightarrow k}\right) \leq U \times \left(1 - yp^{j \rightarrow k}\right) \quad (4)$$

où  $U$  est un nombre très grand et  $\varepsilon=2$ . Enfin, les variables binaires sont introduites à l'aide d'inégalités comme dans le chapitre précédent pour pouvoir introduire le critère portant sur le nombre d'interconnexions dans le réseau et ce, pour chaque courant qui circule.

### ***1.2 Méthode de résolution du problème multiobjectif***

Le problème global reste ainsi linéaire et est résolu sous GAMS à l'aide d'un MILP avec le solveur CPLEX 9.0. Dans les études antérieures, ce type de réseau est toujours optimisé en minimisant un seul critère pouvant être la consommation énergétique globale ou encore une fonction coût regroupant plusieurs critères en un seul. Or, traiter un tel problème selon un seul objectif tend à réduire l'espace des solutions car un seul réseau est finalement obtenu. Suite aux chapitres précédents, il est évident que toutes les solutions doivent être envisagées et que nombre d'entre elles peuvent présenter un choix potentiel pour l'utilisateur. Ainsi, plusieurs objectifs sont proposés et seront utilisés ou non selon le réseau optimisé :

- $F_1$  : la consommation d'eau fraîche (exprimée en T/h),
- $F_2$  : le débit d'eau régénérée (T/h),
- $F_3$  : le nombre de connexions dans le réseau,

- $F_4$  : la consommation énergétique totale (kW)
- $F_5$  : le nombre d'échangeurs de chaleur présents dans le réseau,
- $F_6$  : un critère de coût pourra aussi être introduit afin d'améliorer les solutions obtenues.

Pour un problème donné, les objectifs choisis sont dans un premier temps minimisés un par un afin d'obtenir les bornes du problème (Utopia values). Ensuite, la stratégie adoptée est identique à celle utilisée pour les réseaux d'eau : elle est basée sur la méthode epsilon-contrainte qui permet d'optimiser un des objectifs en bornant ou en fixant les autres à des valeurs définies.

### 1.3 Premier exemple d'application : 8 procédés

Le premier réseau est issu d'une étude de Bagajewicz et al. (2002) et a été repris plus tard par Feng et al. (2009). Il comporte 8 procédés mais n'a pas d'unité de régénération. Le modèle contient ainsi 103 contraintes et 140 variables. La température de l'eau fraîche est fixée à 20°C et celle des eaux rejetées à l'égout ne doit pas excéder 30°C. Les données du problème se trouvent dans le tableau IV-1.

<i>Procédé</i>	$C max_j^e$ (ppm)	$C max_j^s$ (ppm)	$M_j$ (g/h)	$TP_j$ (°C)
1	25	80	2000	40
2	25	90	2880	100
3	25	200	4000	80
4	50	100	3000	60
5	50	800	30000	50
6	400	800	5000	90
7	400	600	2000	70
8	0	100	1000	50

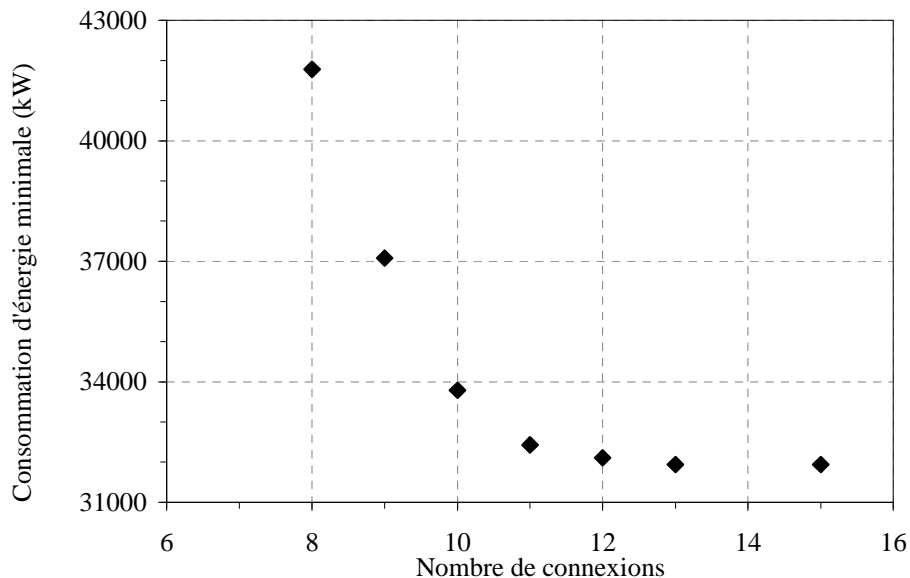
Tableau IV-1. Données de l'exemple 1.

Même si ce réseau ne comporte pas d'unité de régénération, il est apparu important de le traiter afin de valider la formulation proposée pour ce qui est de l'introduction des températures et du calcul du flux énergétique total. Tel qu'il est posé, le problème nécessite une optimisation tri-critère. Afin de borner les valeurs des différents objectifs, des optimisations monocritères ont été menées et les résultats figurent dans le tableau IV-2.

	<i>Eau Fraîche (T/h)</i>	<i>Nombre de connexions</i>	<i>Energie totale (kW)</i>
<b>Valeur minimale</b>	125.9	8	31943

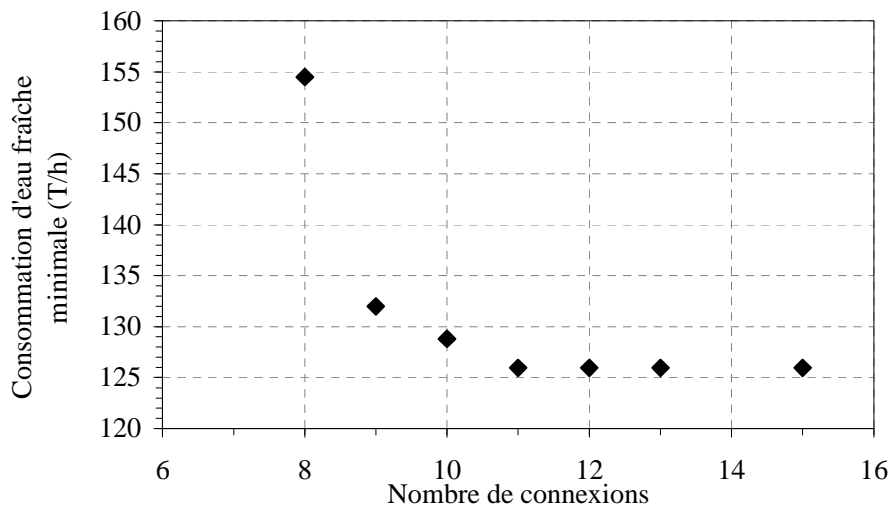
Tableau IV-2. Résultats des optimisations monocritères pour l'exemple 1

Le débit d'eau fraîche minimal pour le réseau est 126 T/h, valeur obtenue par Bagajewicz et al. (2002), ainsi que par Feng et al. (2009). Le nombre de connexions minimal est 8 alors que lorsque ce paramètre est laissé libre il atteint 64. Enfin, le minimum du flux énergétique à fournir pour que le réseau fonctionne est de 31943 kW. Cette valeur ne peut pas être comparée à la valeur trouvée par les autres auteurs car le problème n'est pas traité de la même façon. Les études antérieures proposent une intégration énergétique tandis qu'ici les échangeurs sont positionnés en entrée de procédé et avant la décharge à l'égout sans intégration si le besoin en température de chacune des unités l'exige. Le but de cette première approche consiste à proposer une aide à la décision efficace suite à l'obtention de l'ensemble des solutions possibles. Cependant, dans les parties suivantes une intégration énergétique sera menée afin de proposer une extension de cette méthode.



**Figure IV-2. Consommation énergétique minimale obtenue pour différents nombre de connexions.**

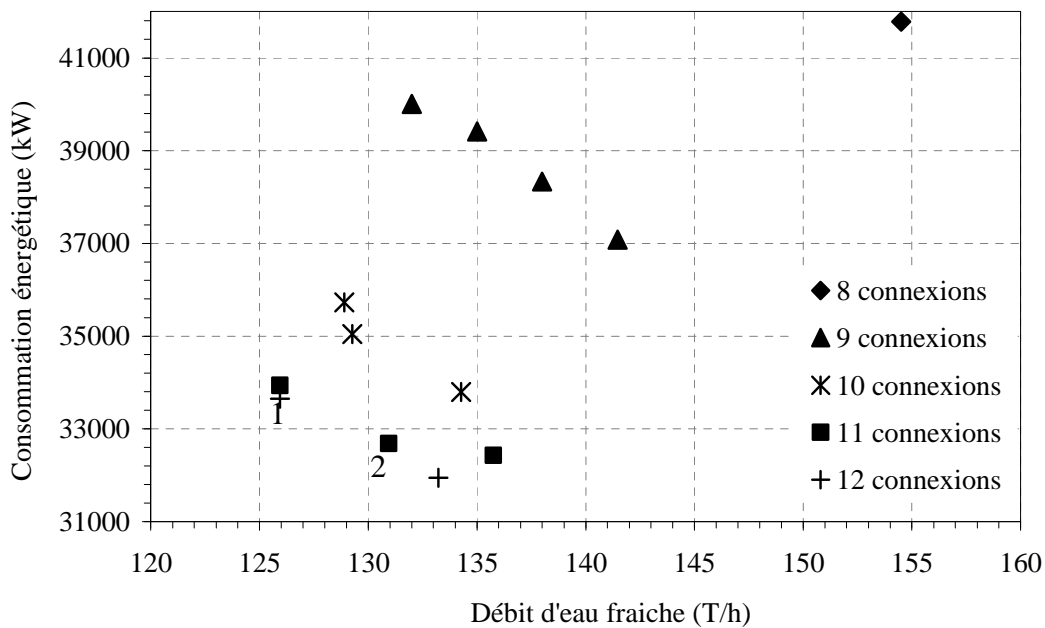
La figure IV-2 met en évidence les résultats de la minimisation du flux énergétique total en fonction du nombre de connexions. De façon prévisible, plus le réseau contient de connexions, moins l'énergie à fournir sera importante car le système est de moins en moins contraint. Si c'est l'eau fraîche qui est considérée au lieu du nombre de connexions, la même tendance est observée sur la figure IV-3 : plus la consommation d'eau fraîche est faible et plus le nombre de connexions minimal augmente dans le réseau.



**Figure IV-3. Consommation d'eau fraîche minimale for différents nombres de connexions.**

Les observations des figures IV-2 et IV-3 montrent que lorsque le nombre de connexions est égal à 12 on peut avoir d'un côté le minimum d'eau fraîche, et de l'autre le minimum d'énergie. En revanche, on ne peut pas avoir les deux en même temps. Ainsi, les optimisations bicritères considérant la consommation énergétique en fonction du débit d'eau fraîche utilisé vont être menées pour un nombre de connexions compris entre 8 et 12.

Ces résultats sont ainsi représentés dans la figure IV-4 qui met seulement en évidence les points non dominés, ce sont donc des fronts de Pareto. En effet, d'autres solutions sont possibles mais elles sont toutes dominées par celles placées sur la figure. Ainsi, pour un réseau très simple avec seulement 8 connexions, une seule solution optimale existe mais cette configuration implique une consommation énergétique de 41800 kW tout en utilisant 154.5 T/h d'eau fraîche ce qui fait de cette solution un réseau simple mais très peu avantageux d'un point de vue économique. En augmentant la complexité des réseaux, les consommations d'eau et d'énergie diminuent mais toujours l'une au détriment de l'autre. Si une connexion est ajoutée, 4 solutions sont disponibles (triangles sur la figure 4) proposant des consommations en eau et énergie plus faibles. Il en est de même lorsque le réseau est constitué de 10, 11 ou 12 connexions. C'est pour 11 connexions que le minimum d'eau fraîche (125.9 T/h) est atteint et pour 12 connexions que la consommation énergétique est minimale (31943 kW). Ces deux valeurs ne peuvent cependant pas être atteintes de façon simultanée.



**Figure IV-4. Résultats de l'optimisation bi-critère du débit d'eau fraîche vs la consommation énergétique pour différents nombres de connexions dans le réseau.**

Dans la littérature, les auteurs trouvent toujours le minimum d'eau fraîche (Bagajewicz et al., 2002 ; Dong et al., 2008 ; Feng et al., 2009) pour le réseau considéré et minimisent ensuite la consommation énergétique globale. Comme cela peut être observé sur la figure 4, seules deux solutions sont disponibles pour le minimum d'eau fraîche : un réseau avec 11 connexions et une consommation de 33934 kW et un autre avec 12 connexions et 33649 kW pour le flux énergétique. Même si ces deux réseaux sont des solutions envisageables ce ne sont pas les seuls et les autres méritent aussi d'être étudiées.

En considérant des coûts donnés dans la littérature, une brève analyse permet de se rendre compte facilement que le réseau noté 1 dans la figure 4 n'est pas forcément le meilleur choix d'un point de vue pratique. Le coût de l'eau fraîche est donné par Kim et al. (2010) à 0.45€ la tonne tandis que le celui de l'énergie est évalué à 0.095€ le kWh d'après le portail de l'énergie en Europe (<http://www.energy.eu/#Industrial>). Pour un nombre de connexions identique (11), les réseaux notés 1 et 2 (Figure IV-4) sont comparés :

- Le réseau 1 consomme environ 5 T/h d'eau de moins que le réseau 2 ce qui lui permet de faire obtenir un bénéfice de 19720 € sur une année complète d'activité avec le coût retenu.

- D'autre part, le réseau 1 consomme 33650 kWh tandis que le réseau 2 demande 32680 kWh d'énergie. Le second permet ainsi un bénéfice de 800 000€ sur un an.

Le réseau 2 permet ainsi de faire plus de 7% de bénéfice en comparaison au réseau 1. Ceci montre bien qu'en fonction des coûts choisis, se placer au minimum d'eau fraîche ne garantit pas une solution optimale en termes de coût. Enfin, la figure 5 montre le schéma du réseau 2. Les connexions reliant les procédés à l'égout sont représentées mais ne sont pas comptabilisées dans le nombre total de connexions, le coût de l'eau étant dérisoire par rapport à celui de l'énergie, faire un choix sur ce seul critère paraît illusoire.

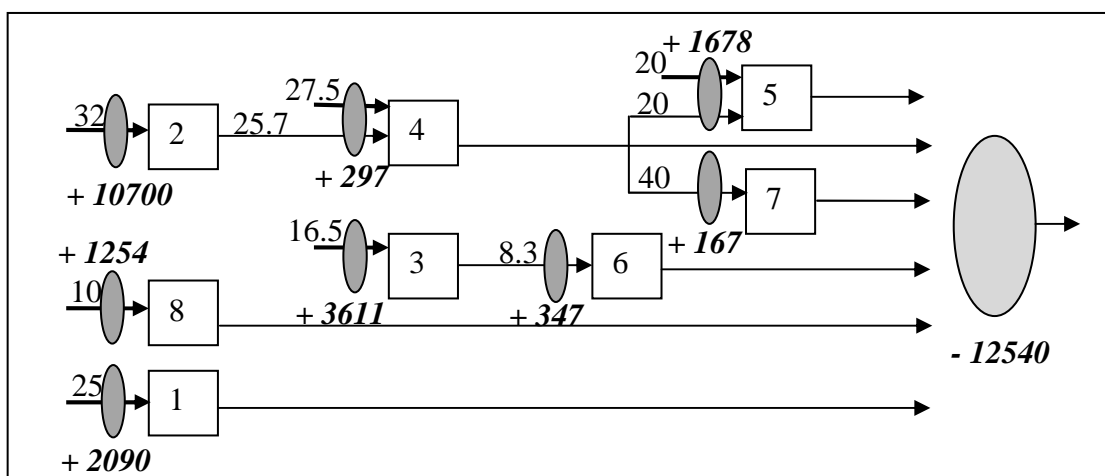


Figure IV-5. Schéma du réseau choisi, noté 2 sur la figure IV-4. Les valeurs en gras italiques représentent les consommations énergétiques (kW) nécessaires et les autres sont les débits d'eau.

## 2. Intégration des réseaux d'eau et de chaleur

### 2.1 Formulation du problème

L'intégration d'un réseau d'eau et de chaleur se réalise en deux étapes :

- La première réside en l'obtention d'un réseau d'eau grâce à la méthode qui a été mise en place dans la partie précédente. Si dans la littérature un seul réseau d'eau est obtenu suite à cette première étape, dans ce travail ce sont des fronts de Pareto qui sont tracés afin de proposer différentes solutions. Cette étape, identique à ce qui a été réalisé dans la partie 1.3 de ce chapitre, se résout à l'aide d'une procédure MILP, le problème se formulant de façon linéaire.



- Une fois les réseaux d'eau optimaux obtenus, la seconde étape consiste à intégrer un réseau d'échangeurs de chaleur dans le réseau d'eau considéré. Pour ce faire, le réseau est décomposé en courants chauds et froids caractérisés par des températures de début et fin de parcours ainsi que par un débit d'eau. Cette nouvelle étape est explicitée dans cette partie du chapitre car elle nécessite un programme mathématique indépendant de celui de la première.

Afin de faciliter la formulation du modèle mathématique, quelques hypothèses basiques de simplification sont initialement introduites :

- Le procédé est stationnaire.
- Les unités de procédé fonctionnent de façon isotherme, c'est-à-dire qu'ils ont la même température d'entrée et de sortie.
- L'intégration de la chaleur implique seulement les courants d'eau et les utilités chaudes ou froides. N'importe quel autre courant est exclu pour des raisons de simplification.
- Les courants considérés ont une capacité calorifique constante.
- Enfin, les échangeurs de chaleur disponibles sont de type contre-courant.

Le modèle permet de concevoir un réseau d'échangeurs de chaleur en minimisant une fonction donnée (coût ou consommation énergétique) tout en satisfaisant des demandes de chauffage et de refroidissement données. La formulation est adaptée d'un modèle développé en 1990 par Yee et al., ce dernier étant basé sur une superstructure en étapes d'un réseau d'échangeur de chaleur représentée sur la figure IV-6.

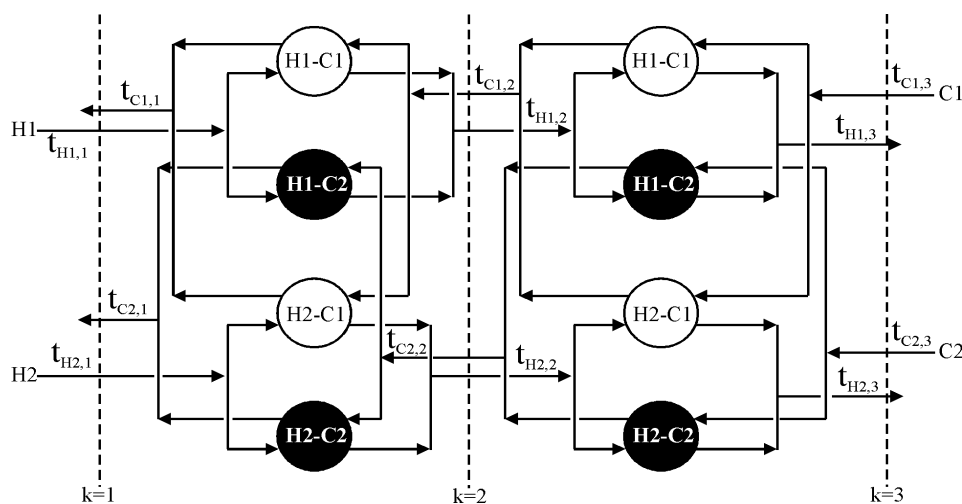


Figure IV-6. Superstructure d'un réseau d'échangeurs de chaleur (modifiée de Yee et al., 1990)

- Lorsque le réseau d'eau à intégrer est obtenu, les courants chauds et froids doivent être isolés de façon à connaître leurs températures d'entrée et de sortie ainsi que le débit calorifique qui les parcourt.

Les données à connaître pour intégrer un tel réseau sont récapitulées dans le tableau IV-3.

<i>Paramètres</i>	<i>Associé à</i>	<i>Symbole</i>	<i>Unité</i>
Débit calorifique	Courants chauds et froids	$Fc(i), Ff(j)$	kW/°C
Température d'entrée	Courants chauds et froids	$Tcin(i), Tfin(j)$	°C
Température de sortie	Courants chauds et froids	$Tcout(i), Tfout(j)$	°C
Température d'entrée	Utilités chaudes (vapeur) et froides (eau)	$tucin, tufin$	°C
Température de sortie	Utilités chaudes (vapeur) et froides (eau)	$tucout, tufout$	°C
Coefficient de transfert de chaleur	Côtés chaud et froid	$hc(i), hf(j)$	kW/m <sup>2</sup> °C
Coefficient de transfert de chaleur pour utilité	Utilités chaudes (vapeur) et froides (eau)	$huc, huf$	kW/m <sup>2</sup> °C
Quantité de chaleur échangée	Courants chauds et froids	$Qtot\_c(i), Qtot\_f(j)$	kW

**Tableau IV-3. Paramètres nécessaires pour l'intégration d'un réseau d'eau**

Les équations permettant de décrire le problème sont basées sur des bilans énergétiques ainsi que des calculs d'aires d'échanges :

- Les bilans énergétiques des courants chauds (i) et froids (j) à l'étape k de la superstructure s'écrivent respectivement :

$$Fc(i) \times (tc(i, k) - tc(i, k + 1)) = \sum_j q(i, j, k) \quad (5)$$

$$Ff(j) \times (tf(j, k) - tf(j, k + 1)) = \sum_i q(i, j, k) \quad (6)$$

- De la même manière, les bilans énergétiques du courant chaud i avec l'utilité froide et du courant froid j avec l'utilité chaude sont :

$$Fc(i) \times (tc(i, k) - tcout(i)) = qf(i) \quad (7)$$

$$Ff(j) \times (tfout(j) - tf(j, k)) = qc(j) \quad (8)$$

- Afin d'affecter les températures d'entrée des courants chauds et froids, les équations (9) et (10) sont introduites :

$$tcin(i) = tc(i, k) \quad (9)$$

$$tfin(i) = tf(j, k) \quad (10)$$

- Les calculs des aires d'échanges pour le couplage d'un courant chaud  $i$  avec un froid  $j$  à l'étape  $k$ , pour un courant froid  $j$  avec une utilité chaude et pour un courant chaud avec une utilité froide sont donnés respectivement par (Yee et al., 1990):

$$A_{Int(i, j, k)} = \frac{q(i, j, k) \times \left( \frac{1}{hc(i)} + \frac{1}{hf(j)} \right)}{\left( dt(i, j, k) \times dt(i, j, k+1) \times \frac{dt(i, j, k) + dt(i, j, k+1)}{2} \right)^{1/3}} \quad (11)$$

$$A_{Ucc(j)} = \frac{qc(j) \times \left( \frac{1}{hf(j)} + \frac{1}{huc} \right)}{\left( (tucin - tfout(j)) \times dtuc(j) \times \frac{(tucin - tfout(j)) + dtuc(j)}{2} \right)^{1/3}} \quad (12)$$

$$A_{Uff(i)} = \frac{qf(i) \times \left( \frac{1}{hc(i)} + \frac{1}{huf} \right)}{\left( (tcout(i) - tufin) \times dtuf(i) \times \frac{(tcout(i) - tufin) + dtuf(i)}{2} \right)^{1/3}} \quad (13)$$

Enfin, les variables binaires  $z$  sont introduites par l'ajout de contraintes logiques afin de pouvoir apprécier la présence ou non des échangeurs et utilités :

$$q(i, j, k) - \min(Q_{tot_c(i)}, Q_{tot_f(j)}) \times z(i, j, k) \leq 0 \quad (14)$$

$$qf(i) - Q_{tot_c(i)} \times z_{uf}(i) \leq 0 \quad (15)$$

$$qc(j) - Q_{tot_f(j)} \times z_{uc}(j) \leq 0 \quad (16)$$

La température minimale d'approche ( $tmapp$ ) représentant les bornes inférieures de  $dt$ ,  $dtuc$  et  $dtuf$  est fixée à  $10^\circ\text{C}$  comme dans la majorité des travaux antérieurs. Les équations (5) à (16) constituent donc un ensemble d'équations non linéaires contenant des variables binaires. Le problème se résout par conséquent à l'aide d'une méthode MINLP. C'est avec le solveur COIN-COUCENNE que les optimisations ont été réalisées car il est capable de gérer une phase d'initialisation de façon autonome.

## 2.2 Exemple d'application

L'exemple permettant de valider cette méthode en deux étapes est issu de Bagajewicz et al. (2002) et a été repris plus récemment par Dong et al. (2008). Il comporte 3 procédés sans unité de régénération. L'eau fraîche arrive dans le réseau à une température de 20°C et l'eau usée doit être rejetée à l'égout à 30°C. Les données de cet exemple sont regroupées dans le tableau IV-4. Pour ce réseau, des données additionnelles sont fournies : il s'agit des débits maximaux autorisés pour chacun des procédés.

<i>Procédé</i>	$C \max_j^e$ (ppm)	$C \max_j^s$ (ppm)	$M_j$ (kg/s)	$TP_j$ (°C)	$W \max_{1,j}$ (kg/s)
1	50	100	5000	100	100
2	50	800	30000	75	40
3	800	1000	50000	100	166.7

Tableau IV-4. Données de l'exemple considéré (Dong et al., 2008)

### 2.2.1 Optimisation du réseau d'eau sans intégration énergétique

Dans un premier temps, la même étude que celle de la partie 1.3 de ce chapitre est menée tout en conservant la même stratégie d'optimisation multiobjective. Les résultats des optimisations monocritères sont d'abord mis en évidence dans le tableau IV-5.

	<i>Eau Fraîche (kg/s)</i>	<i>Nombre de connexions</i>	<i>Energie totale (kW)</i>
<b>Valeur minimale</b>	77.27	3	46930

Tableau IV-5. Résultats des optimisations monocritères pour le réseau considéré.

Le minimum de connexions (toujours hormis celles allant à l'égout) se situe à 3 et le débit d'eau fraîche est minimal lorsqu'il vaut 77.27 kg/s, valeur obtenue par les études précédentes. Enfin, la consommation énergétique minimale sans intégration énergétique est de 46930 kW.

Ce réseau, avec 3 unités de procédés, est relativement simple ce qui explique qu'il n'existe que trois solutions non dominées (Tableau IV-6). Par conséquent, ces solutions ne sont pas illustrées par des fronts de Pareto mais sont regroupées dans le tableau IV-6.

	<i>Eau Fraîche (kg/s)</i>	<i>Nombre de connexions</i>	<i>Energie totale (kW)</i>
<b>Réseau 1</b>	87.5	3	47025
<b>Réseau 2</b>	77.27	5	48450
<b>Réseau 3</b>	88.2	5	46930

Tableau IV-6. Résultats des optimisations multicritères

Pour 3 connexions, le réseau consommerait 87.5 kg/s d'eau fraîche et 47025 kW pour le flux énergétique (Réseau 1). En ajoutant 2 connexions, soit on améliore le débit d'eau fraîche en passant au minimum possible : 77.27 kg/s (Réseau 2) soit on améliore la consommation énergétique en la diminuant jusqu'au minimum possible : 46930 kW (Réseau 3). Systématiquement, dans les travaux antérieurs, le réseau désigné est celui qui correspond au minimum d'eau fraîche, soit dans le cas présent, le réseau 2. Cependant, ce point ne garantit pas forcément un coût ou une consommation énergétique optimale, d'où l'intérêt d'une telle étude multiobjective. Les schémas des 3 réseaux sont représentés sur la figure IV-7.

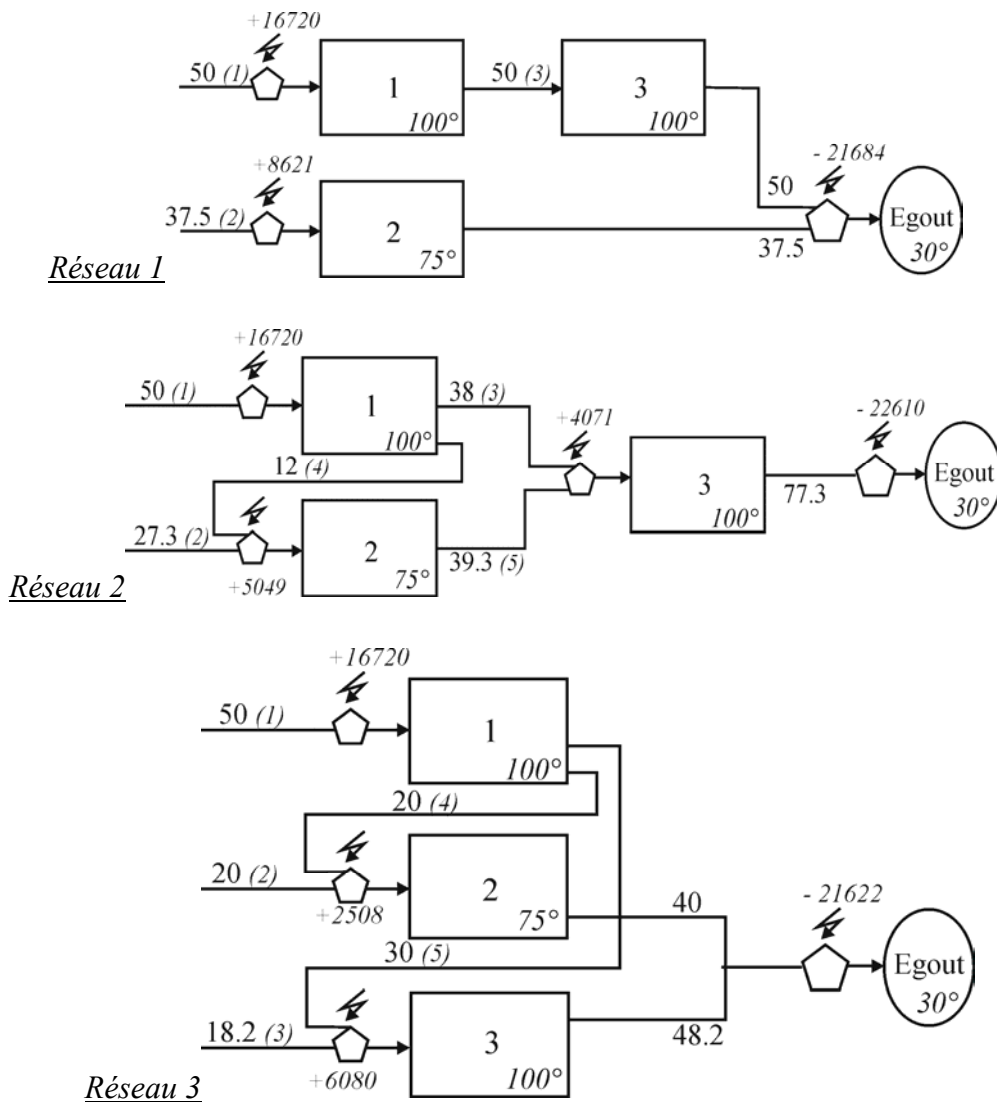


Figure IV-7. Schémas des 3 réseaux.

Les débits d'eau sont exprimés en kg/s, le numéro de la connexion est indiqué entre parenthèses et l'utilité à fournir pour chaque échangeur de chaleur est indiquée en kW, en italique. Une utilité négative représente un refroidissement et une positive un réchauffement.

### 2.2.2 Amélioration des solutions via l'intégration énergétique

Afin de choisir une solution parmi les 3 réseaux proposés, un coût est désormais introduit en tant que critère à minimiser pour la résolution MINLP visant à mener une intégration énergétique des réseaux. Le programme MINLP est celui explicité à la fin de la partie 2.1 du présent chapitre. Chaque réseau est ainsi décomposé en courants froids et chauds possédant un débit calorifique donné ainsi que des températures d'entrée et de sortie fixées. Le critère est issu de Dong et al. (2008) dans le but de comparer les résultats avec ceux obtenus dans cette étude. De façon commune (Bogataj et Bagajewicz, 2008 ; Dong et al., 2008), la fonction objectif s'exprime par l'équation suivante :

$$\begin{aligned}
 \text{Coût} = & \sum_i \sum_j \sum_k C_{EC}(i, j) \times z(i, j, k) + \sum_i C_{EC}(i) \times z_{uf}(i) + \sum_j C_{EC}(j) \times z_{uc}(j) \\
 & + \sum_i \sum_j \sum_k C_A(i, j) \times A_{Int}(i, j, k)^\beta + \sum_i C_A(i) \times A_{uff}(i)^\beta + \sum_j C_A(j) \times A_{ucc}(j)^\beta \\
 & + f_a \left( \sum_i C_{uf}(i) \times qf(i) + \sum_j C_{uc}(j) \times qc(j) \right) + \sum_j W_{1,j} \times C_{EF} \\
 & + C_{con} \left( \sum_i \sum_{i^0 \neq i} \sum_k yf(i, i^0, k) + \sum_j \sum_{j^0 \neq j} \sum_k yc(j, j^0, k) \right)
 \end{aligned} \tag{17}$$

Cette fonction exprimant le coût total du réseau prend ainsi en compte :

- Le coût d'investissement des échangeurs de chaleur par :

$$\begin{aligned}
 & \sum_i \sum_j \sum_k C_{EC}(i, j) \times z(i, j, k) + \sum_i C_{EC}(i) \times z_{uf}(i) + \sum_j C_{EC}(j) \times z_{uc}(j) + \\
 & \sum_i \sum_j \sum_k C_A(i, j) \times A_{Int}(i, j, k)^\beta + \sum_i C_A(i) \times A_{uff}(i)^\beta + \sum_j C_A(j) \times A_{ucc}(j)^\beta
 \end{aligned} \tag{18}$$

- Le coût d'investissement des connexions du réseau :

$$C_{con} \left( \sum_i \sum_{i^0 \neq i} \sum_k yf(i, i^0, k) + \sum_j \sum_{j^0 \neq j} \sum_k yc(j, j^0, k) \right) \tag{19}$$

- Le coût annuel de la consommation énergétique du réseau :

$$f_a \left( \sum_i C_{uf}(i) \times qf(i) + \sum_j C_{uc}(j) \times qc(j) \right) \tag{20}$$

- Le coût de l'eau fraîche consommée :

$$\sum_j W_{1,j} \times C_{EF} \quad (21)$$

Les paramètres retenus pour les différents coûts utilisés dans les équations (17) à (21) sont regroupés dans le tableau IV-7, les valeurs sont issues de Dong et al. (2008).

<i>Symbole</i>	<i>Signification</i>	<i>Valeur</i>	<i>Unité</i>
$C_{EC}$	Coût fixe d'investissement pour un échangeur de chaleur	8000	\$/an
$C_A$	Facteur préexponentiel pour le coût de l'aire d'échange	1200	\$/an
$C_{uf}$	Coût de l'utilité froide	189	\$/kW
$C_{uc}$	Coût de l'utilité chaude	377	\$/kW
$C_{EF}$	Coût de l'eau fraîche	0.45	\$/T
$\beta$	Exposant pour le coût des aires	0.6	-
$f_a$	Fraction de temps d'opération de l'usine	0.91 (8000h/an)	-
$tucin, tucout$	Températures d'entrée et de sortie de la vapeur pour chauffer	120	°C
$tufin, tufout$	Températures d'entrée et de sortie de l'eau pour refroidir	10 et 20	°C
$huc, huf, hc, hf$	Coefficients de transfert de chaleur	0.5	kW/m <sup>2</sup> °C
$tmapp$	Température minimale d'approche	10	°C

**Tableau IV-7. Paramètres de coûts et d'opérations pour le réseau d'échangeurs de chaleur.**

Pour les 3 réseaux présentés plus haut, l'intégration énergétique est effectuée avec la procédure MINLP résolue avec COIN-COUCENNE sous GAMS. La particularité de ce solveur est de mener une phase d'initialisation de façon autonome facilitant les calculs. Lors de cette étape, le but est de trouver lequel des 3 précédents réseaux intégrés conduit à un coût minimum. Le coût global explicité avec l'équation (17) est séparé de façon logique en deux termes distincts :

- Un coût d'investissement (CI), regroupant les équations (18) et (19) donné par :

$$CI = \sum_i \sum_j \sum_k C_{EC}(i, j) \times z(i, j, k) + \sum_i C_{EC}(i) \times z_{uf}(i) + \sum_j C_{EC}(j) \times z_{uc}(j) + \sum_i \sum_j \sum_k C_A(i, j) \times A_{int}(i, j, k)^\beta + \sum_i C_A(i) \times A_{uff}(i)^\beta + \sum_j C_A(j) \times A_{ucc}(j)^\beta + C_{con} \left( \sum_i \sum_{i^0 \neq i} \sum_k yf(i, i^0, k) + \sum_j \sum_{j^0 \neq j} \sum_k yc(j, j^0, k) \right) \quad (22)$$

- Un coût annuel opérationnel (CAO), exprimé par la somme des équations (20) et (21) :

$$CAO = f_a \left( \sum_i C_{uf}(i) \times qf(i) + \sum_j C_{uc}(j) \times qc(j) \right) + \sum_j W_{1,j} \times C_{EF} \quad (23)$$

Le tableau IV-8 regroupe les données relatives aux caractéristiques et aux résultats de l'optimisation pour les 3 réseaux ainsi que pour le réseau optimal obtenu par Dong et al. (2008). Dans cette dernière étude, les auteurs ont intégré directement le réseau conduisant au minimum d'eau fraîche sans proposer d'optimisation multiobjectif préalable. Cependant, il est important de constater que l'intégration du réseau 2 (minimum d'eau fraîche) conduit à un coût total minimal de 4.31 M\$ alors que Dong annonce une valeur de 2.937 M\$ pour le même réseau. La différence entre ces deux résultats provient du fait que le programme MINLP utilisé dans le présent travail n'autorise pas les divisions de courant. Cela signifie qu'un courant va forcément d'un procédé à un autre sans pouvoir se diviser, ce qui contraint d'avantage le problème. Par conséquent, une optimisation MINLP a aussi été réalisée sur le réseau 2 en autorisant les divisions de courant. La valeur obtenue pour le coût total minimum est 2.938 M\$ (Tableau IV-8), elle est pratiquement égale à celle avancée par Dong et al. (2008).

<i>Réseaux</i>	<i>Caractéristiques</i>	<i>CI (M\$)</i>	<i>CAO (M\$)</i>	<i>Coût Total (M\$)</i>
Réseau 1 (Nombre minimal de connexions)	2 courants froids 2 courants chauds	0.468	2.398	2.861
Réseau 2 (Consommation d'eau fraîche minimale)	3 courants froids 2 courants chauds	0.57	3.74	4.31
Réseau 3 (Consommation énergétique minimale)	3 courants froids 3 courants chauds	0.601	3.149	3.75
Réseau de Dong et al. (2008)	4 courants froids 3 courants chauds	0.305	2.632	2.937
Réseau 2 avec divisions de courants	4 courants froids 3 courants chauds	0.567	2.371	2.938

**Tableau IV-8. Résultats de l'intégration énergétique sur les 3 réseaux retenus.**

Enfin, à la lecture des résultats, une information importante à retenir est que le coût minimal est obtenu pour le réseau 1. Ce réseau était celui qui comportait le plus faible nombre de connexions lors de la première étape et des consommations d'eau et d'énergie intermédiaires. Or, suite à l'intégration énergétique, c'est celui-ci qui minimise le mieux le coût total avec 2.861M\$.



Cette étude préalable montre ainsi l'utilité de mener à bien une analyse multiobjectif post-intégration dans le sens où ce n'est pas forcément le réseau atteignant le minimum d'eau fraîche qui devient optimal lorsque le coût est minimisé. Dans ce cas, le réseau le plus simple est le plus avantageux en termes de coût annuel, déclassifiant même la solution proposée par Dong et al. (2008) dans laquelle les divisions de courants étaient autorisées.

### 3. Optimisation multiobjectif d'un cas réel industriel

#### 3.1 Transformation du problème original

L'optimisation est à présent menée sur un cas réel de réseau de façon à étudier le problème de façon plus concrète. Le réseau d'eau étudié est inspiré d'une industrie papetière Malaisienne. Manan et al. (2009) ont optimisé ce réseau à l'aide de la méthode du pincement en minimisant la consommation d'eau fraîche d'abord puis l'énergie dans une seconde étape. Au sein de ce type d'industrie, l'eau est utilisée en abondance pour des procédés tels que la dilution, le nettoyage, la production de vapeur ou encore la mise en forme des feuilles de papier. D'autre part, l'énergie thermique est employée au niveau des procédés de séchage et pour générer l'électricité de l'usine. La figure IV-8 montre la structure de l'usine telle qu'elle fonctionne actuellement.

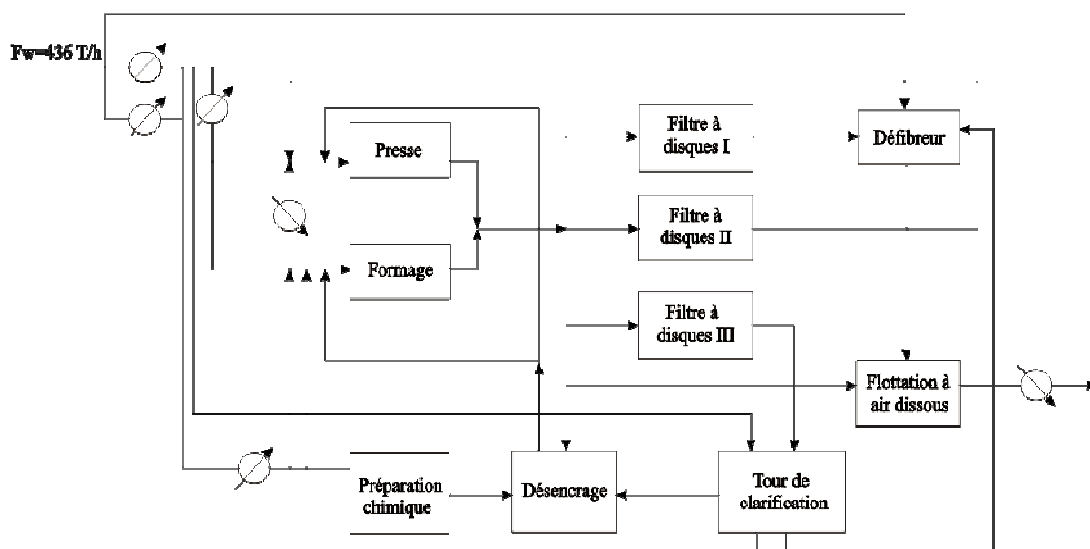


Figure IV-8. Superstructure de l'industrie papetière avant optimisation (Manan et al. 2009).

La méthode utilisée dans ce travail exige des données de départ bien précises pour optimiser le réseau. Comme indiqué précédemment, il est nécessaire d'obtenir pour chacune

des unités de procédés, des concentrations maximales d'entrée et/ou de sortie, une température de fonctionnement et un débit d'eau maximal. Manan et al. (2009) ont travaillé sur la méthode du pincement via une séparation des données en sources et demandes obtenue à partir de la figure IV-8. Ainsi, l'étape de presse par exemple, se décompose en 3 sous-unités de procédé ayant chacune leurs caractéristiques bien définies. De plus, les concentrations de sortie sont connues en différents points après mélange de certains courants. Tous les courants sortant des stations de formage et de pressage (soit 5 au total) se mélangent et c'est après ce mélange que la concentration est connue, dans ce cas elle est de 3750 ppm. C'est à partir de ces valeurs, que la charge en contaminant  $M_j$  de chaque unité est déduite de la relation suivante :

$$M_j = C \max_j^s \times We_1^j - C \max_j^e \times We_1^j \quad (24)$$

avec  $We_1^j$  le débit d'eau fixé pour le procédé  $j$  représentant la somme des courants entrant en tenant compte de l'eau fraîche, de l'eau régénérée et de l'eau provenant directement des autres procédés. Une fois tous les calculs nécessaires effectués, le réseau contient 12 unités de procédé, 4 unités de régénération et un polluant (Figure IV-9). Le polluant considéré représente la quantité totale de solides en suspension mesurée en parties par million (ppm), il rassemble ainsi différentes variétés de polluants inclus dans l'eau permettant d'assimiler le problème à un système monopolluant.

Dans cette usine, la machine à papier est composée de deux sections : une unité de formation suivie d'une presse. Une fois formée, la pulpe de bois est appelée « stock » et c'est ce stock qui est envoyé vers la section de formage afin que la feuille de papier soit constituée puis amenée vers les presses. La machine à papier peut ainsi recevoir de l'eau des différentes unités de régénération, de l'unité de défibrage ainsi que de la tour de clarification. Cependant, les différentes unités constituant la machine à papier ne peuvent pas s'échanger des courants d'eau. L'eau apportée au sein de la machine est utilisée pour éliminer les débris des sections de formage et de pressage, elle est ensuite enlevée du stock et quitte la machine. Cette eau est alors envoyée en partie vers les filtres à disques afin de récupérer les nombreuses fibres qu'elle transporte. Elle peut aussi être dirigée vers le procédé de désencrage ainsi que vers l'unité de flottation à air dissous. Il est important de noter qu'une importance est apportée aux trajets des courants d'eau, celui des fibres et de la pulpe de bois n'étant pas le cœur du sujet traité dans ce travail. Le décanteur (défibreux) est alimenté en eau afin d'extraire les polluants

plus lourds que les fibres, de l'eau fraîche lui est en général nécessaire (défibreur I). Enfin, l'eau fraîche est aussi utilisée pour dilution lors du désencrage chimique. Les 4 unités de régénération disponibles sont 3 disques de filtration et 1 unité de flottation à air dissous. La première catégorie repose sur un principe classiquement utilisé dans les industries papetières : cela fonctionne en passant les eaux usées à travers des filtres à disques (filtrant sur les deux faces) afin de disposer dans un espace réduit de la plus grande surface pour piéger le contenu solide. L'unité de flottation à air dissous, est une technique de purification de l'eau utilisée pour enlever les particules en suspension. En générant de fines bulles de gaz dans l'eau usée, par introduction d'eau saturée et de gaz (généralement de l'air) sous pression, les particules à éliminer fixent les microbulles et remontent à la surface où elles sont récupérées. Ainsi, l'eau soutirée en bas du décanteur quitte l'unité à de plus faibles concentrations. Les données annoncées sur la figure IV-9 sont celles qui ont été récupérées à partir des schémas de fonctionnement de l'usine et ceux obtenus par Manan et al. (2009).

<i>Procédés</i>	<i>Type</i>	$We_1^j$ (T/h)	$C \max_j^e$ (ppm)	$M_j$ (g/h)	$T$ (°C)
1	Formage I	54	20	201420	50
2	Formage II	155	160	556450	43
3	Pressage I	126	20	469980	50
4	Pressage II	169	100	616850	43
5	Pressage III	677	160	2430430	43
6	Défibreur I	18	20	2826	38
7	Défibreur II	104	160	1775	46
8	Défibreur III	68	250	-4993	40
9	Préparation chimique	36	20	0	81
10	Procédé de désencrage	432	148	756720	49
11	Clarification I	202	20	28224	38
12	Clarification II	1130	150	11304	46
<i>Unités de régénération</i>	<i>Type</i>	$Wre_1^l$ (T/h)	$C_l^s$ (ppm)		$T$ (°C)
1	Disque de filtration I	169	250	-	40
2	Disque de filtration II	436	100	-	43
3	Disque de filtration III	1130	150	-	46
4	Flottation à air dissous	832	150	-	48

Tableau IV-9. Données de l'usine de pâtes et papiers.

Les charges en contaminants ont été calculées a posteriori. L'ensemble des données est consigné dans le tableau IV-9 pour plus de lisibilité.

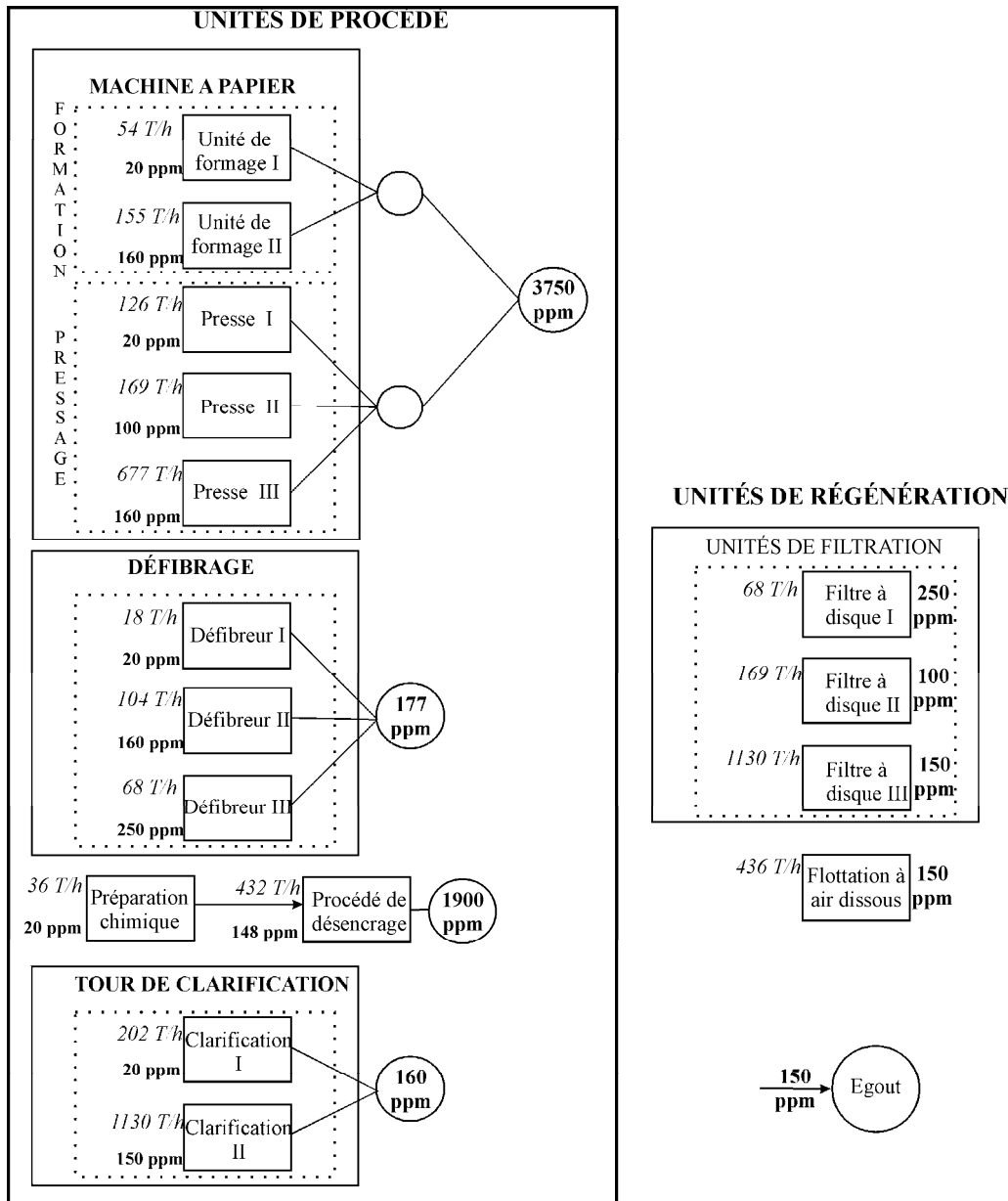
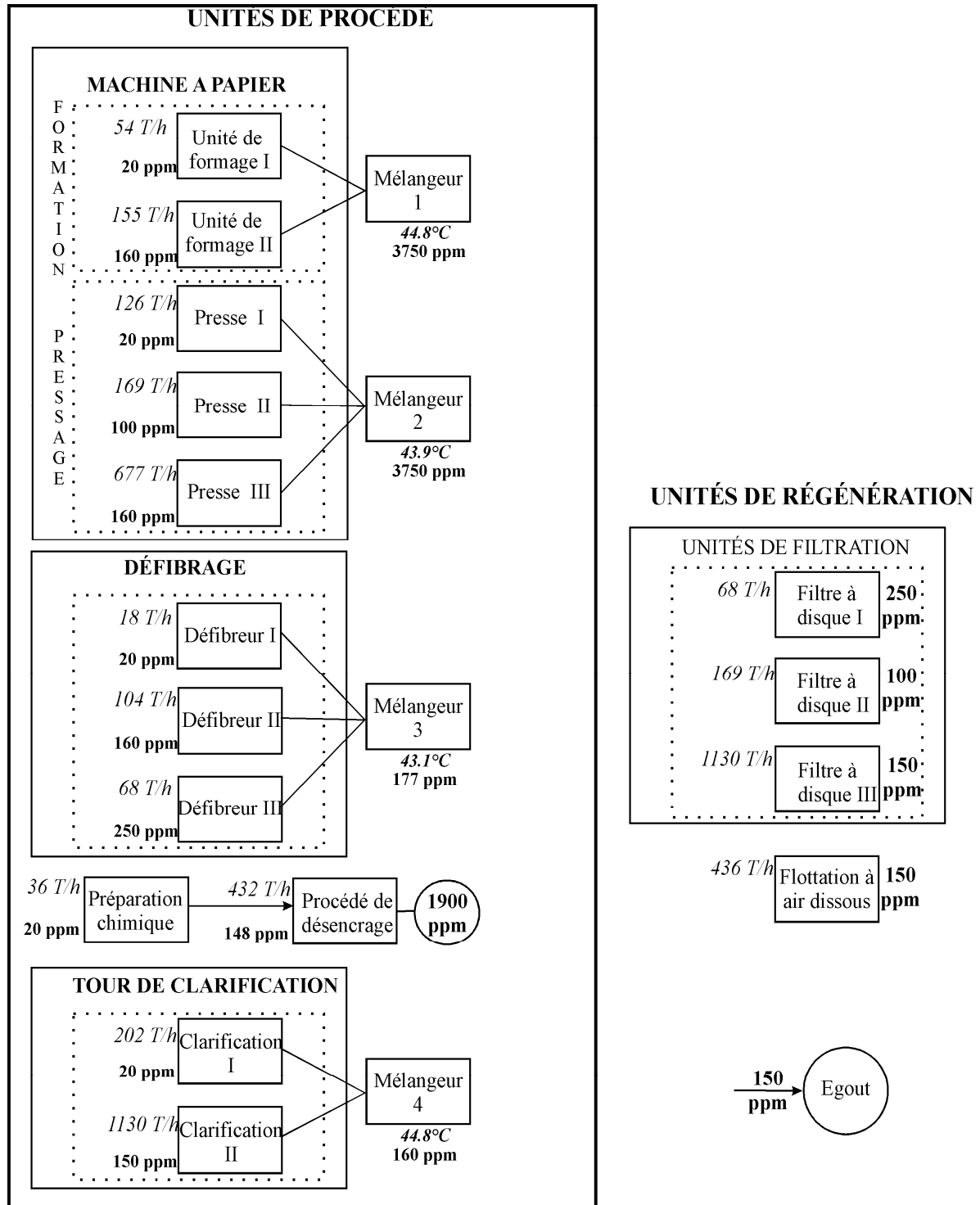


Figure IV-9. Superstructure de l'usine contenant 12 procédés et 4 unités de traitement. Les données écrites sont celles avancées par Manan et al. (2009) : les concentrations maximales d'entrée des procédés, les concentrations post-régénération ainsi que les débits d'eau.

Les températures étaient données pour chacun des procédés, cependant, une réécriture plus pertinente a permis d'écrire le problème tel que le montre la superstructure de la figure IV-10. Dans cette figure, des « boîtes » ont été ajoutées afin que l'estimation des températures

concorde davantage à la réalité. Par exemple, à la sortie de l'unité de formation, les deux courants provenant des unités de formation I et II se mélangent à présent avec leurs débit et température respectifs. Cet artifice permet de distribuer un courant ayant une température plus adaptée au cas réel et augmente le nombre de procédés de 4 unités. Les 4 procédés ainsi créés n'ont cependant pas les mêmes possibilités que les autres : ils ne peuvent recevoir l'eau que de leur prédécesseur. Cela signifie que le courant sortant de l'unité de formage I ne peut aller qu'au mélangeur I (figure IV-10) et ce dernier ne peut recevoir que ce courant et celui provenant de l'unité de formage II. Le réseau global comporte désormais 16 procédés et 4 unités de régénération. Pour terminer avec les paramètres, selon Manan et al. (2009), la température de l'eau fraîche est fixée à 30°C et l'eau doit être rejetée à l'égout à une température de 35°C.

A l'instar de ce qui a été réalisé précédemment, ce réseau va être optimisé selon plusieurs méthodes. Dans un premier temps, l'allocation est réalisée afin d'obtenir des fronts de Pareto exprimant le débit d'eau fraîche en fonction de la consommation énergétique. Ensuite, une intégration énergétique est menée en minimisant plusieurs critères de coût. Pour terminer, une analyse plus intuitive post-allocation sera aussi menée afin d'avoir une grille de comparaison des méthodes complète.



### 3.2 Allocation du réseau d'eau et de chaleur

Comme cela peut être observé sur la figure IV-8, le réseau actuel de l'industrie comporte 6 échangeurs de chaleur. Dans cette étude, un échangeur peut être placé si nécessaire à l'entrée de chacun des procédés, il peut chauffer ou refroidir en fonction du besoin. Dans la pratique, il n'est pas très intéressant, en terme de coût d'investissement de positionner un échangeur sur chacun des 12 procédés, des 4 unités de régénération et de l'égout soit 18 échangeurs au total. C'est ainsi qu'un nouveau critère est formulé : le nombre d'échangeurs présents dans le réseau, ce critère doit être minimisé. Ceci transforme le problème, car il implique l'ajout de variables binaires. Les objectifs retenus sont ainsi : le débit d'eau fraîche, la consommation énergétique, le nombre d'échangeurs et enfin le nombre de connexions.

#### ➤ Optimisations préalables

Afin d'obtenir les bornes du problème, le réseau est optimisé selon un seul objectif au préalable, et ce, pour les 4 critères. Les résultats sont ainsi donnés dans le tableau IV-10.

<i>Critères</i>	<i>Débit d'eau fraîche (T/h)</i>	<i>Energie totale (kW)</i>	<i>Nombre d'échangeurs</i>	<i>Nombre de connexions</i>
<b>Valeur minimale</b>	377.5	36621	8	27

**Tableau IV-10. Résultats des optimisations monocritères.**

A ce stade, il est important de noter que la consommation d'eau fraîche minimale obtenue est 377.5 T/h, valeur préalablement annoncée par Manan et al. (2009). Cela vient créditer la formulation du problème et montre que le réseau est traité de façon identique à ce qui a été réalisé auparavant. Le nombre de connexions est étroitement lié au nombre d'échangeurs présents dans le réseau : plus le réseau va contenir des échangeurs de chaleur et moins celui-ci va être complexe car moins contraint. La figure IV-11 représente ainsi le nombre de connexions minimal pour chaque nombre d'échangeurs dans le réseau. Ainsi, dans la suite de l'étude, lorsque le nombre d'échangeurs est fixé, le nombre de connexions minimal lui est automatiquement associé dans le programme. Par exemple, lorsqu'un réseau à 8 échangeurs est traité, il comportera forcément un nombre de connexions inférieur à 41+2. La valeur 2 est ajoutée au nombre minimal (41 dans l'exemple) pour assurer un degré de liberté supplémentaire. Cette démarche permet de ne plus avoir à se préoccuper du nombre de

connections en gardant à l'esprit qu'il est toujours minimisé dans les résultats qui suivent et lié au nombre d'échangeurs dans le réseau.

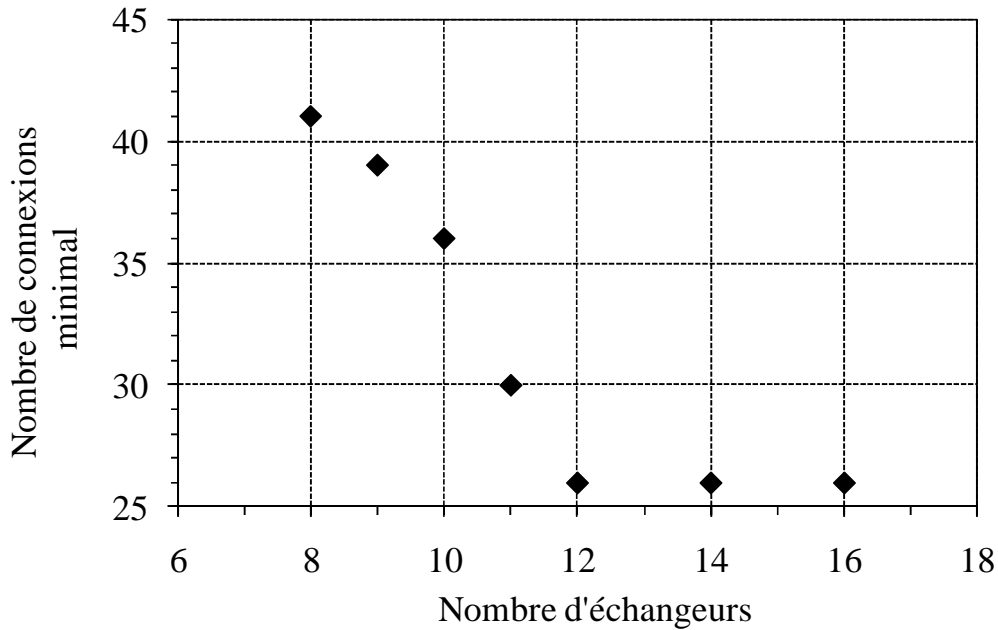


Figure IV-11. Nombre de connexions minimal en fonction du nombre d'échangeurs présents.

#### ➤ *Optimisation multiobjectif*

Pour un nombre d'échangeurs fixé dans le réseau, et par conséquent pour un nombre de connexions restreint, l'optimisation bi-critère est menée et conduit à l'ensemble des solutions représentées sur la figure IV-12. De nombreux points sont dominés par d'autres, ce ne sont donc pas des fronts de Pareto qui sont figurés ici, mais l'ensemble des résultats.

Lorsque le nombre d'échangeurs est fixé à 8, soit au minimum, la consommation minimale d'eau fraîche est alors de 406.8 T/h, tandis que 377.5 T/h d'eau sont consommées quand le réseau contient 13 échangeurs. Enfin, la consommation énergétique minimale, soit 36621 kW est obtenue pour un réseau à 10 échangeurs et celle-ci augmente avec par ordre croissant d'énergie, 9, 8 puis 11, 12 et 13 échangeurs. Afin d'augmenter la lisibilité des résultats, la figure 15 montre les fronts de Pareto obtenus, c'est-à-dire les points non dominés.

La première observation est le fait qu'il ne reste plus que 8 solutions possibles pour des débits d'eau fraîche variant entre 377.5 et 411 T/h.



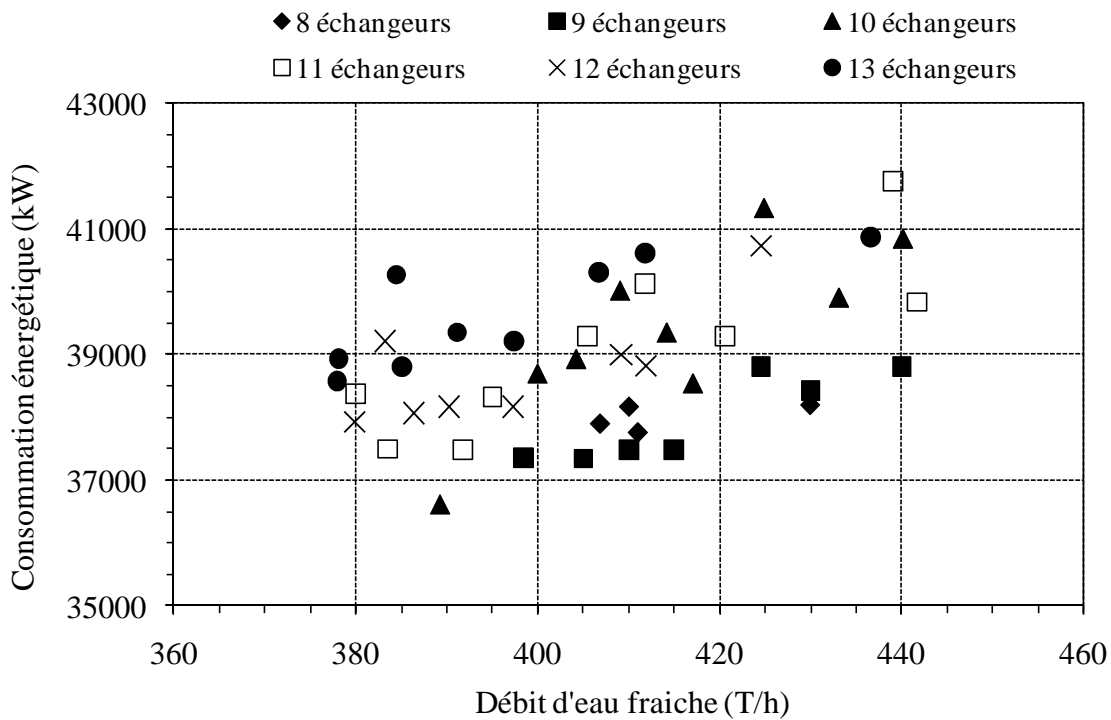


Figure IV-12. Ensemble des solutions obtenues pour des nombres de connexions et d'échangeurs limités.

Plusieurs tendances peuvent être mises en exergue :

- La diminution du nombre d'échangeurs et de connexions dans le réseau influe très fortement sur le débit d'eau fraîche consommée. En effet, c'est pour 8 échangeurs que la consommation d'eau fraîche est la plus importante, puis en augmentant le nombre d'échangeurs et de connexions, le débit d'eau diminue jusqu'à atteindre sa valeur minimale lorsque 13 échangeurs sont mis en jeu.
- La consommation énergétique ne varie pas de la même manière, c'est pour 10 échangeurs qu'elle est la plus faible et elle augmente si l'on ajoute ou enlève des échangeurs de chaleur.
- En revanche, pour un nombre d'échangeurs et de connexions donnés, le débit d'eau fraîche et la consommation énergétique varient en sens inverse. Ces deux critères sont donc bien antagonistes.

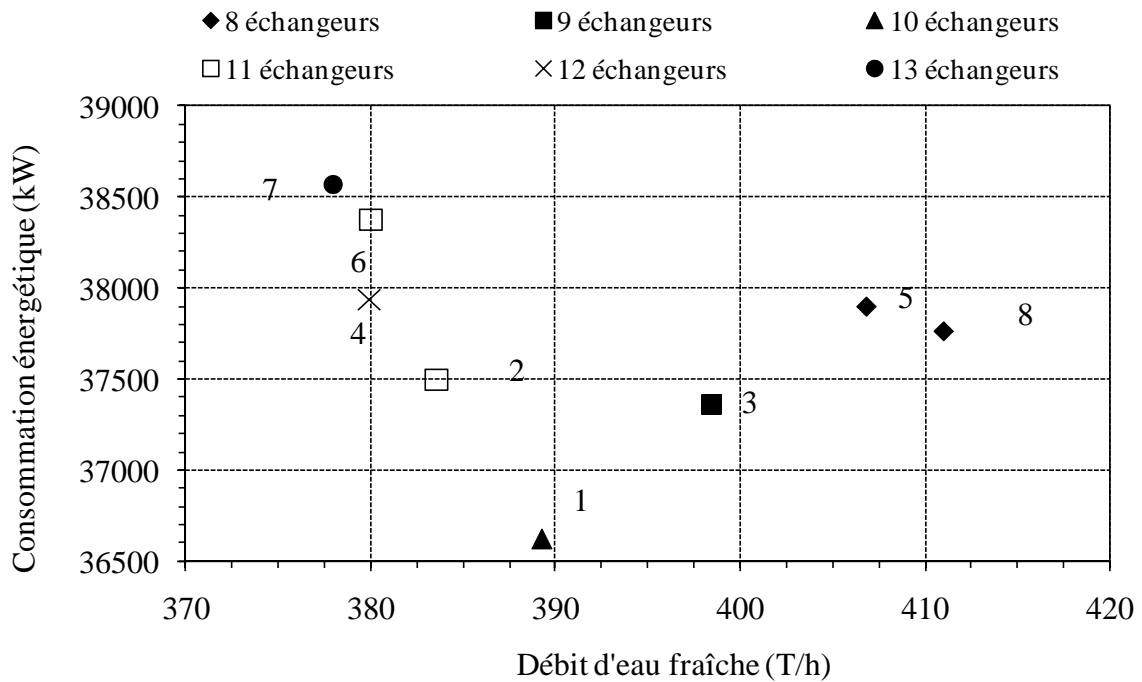


Figure IV-13. Fronts de Pareto pour des nombres de connexions et d'échangeurs limités. Les nombres associés à chacun des points représentent le rang TOPSIS (cf. Tableau IV-11).

#### ➤ Analyse post-optimisation

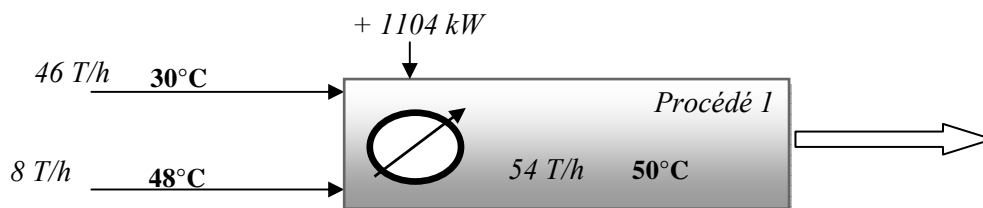
La mise en œuvre de l'un des 8 réseaux obtenus doit forcément passer par une réflexion post-optimisation. Le décideur qui doit choisir parmi les 8 solutions peut dans un premier temps utiliser un programme tel que TOPSIS (Ren et al., 2007) par exemple, afin de classer les solutions en tenant compte des différents objectifs. Cette analyse a été menée sur les 8 réseaux afin d'estimer leur classement lorsque tous les objectifs ont le même poids. Les résultats sont présentés dans le tableau IV-11.

C'est sur le réseau classé premier selon l'analyse TOPSIS que la démarche va être explicitée. L'enjeu de cette étape consiste à positionner de façon judicieuse les différents échangeurs de chaleur dans le réseau. L'optimisation sous GAMS permet de savoir quels sont les procédés et les unités de régénération qui vont être précédés par un échangeur et quelle utilité devra lui être fournie. Cependant, il est possible d'optimiser davantage la configuration finale en plaçant l'échangeur sur le courant entrant dans le procédé de façon à minimiser son aire d'échange.

<i>Rang TOPSIS</i>	<i>Nombre d'échangeurs</i>	<i>Consommation d'énergie (MW)</i>	<i>Consommation d'eau fraîche (T/h)</i>
1	10	36.62	389.3
2	11	37.49	383.5
3	9	37.36	398.5
4	6	37.93	379.3
5	8	37.90	406.9
6	11	38.38	383.8
7	13	38.57	377.5
8	8	37.76	411.0

**Tableau IV-11. Résultats de l'analyse TOPSIS classant les 8 réseaux par ordre de priorité vis-à-vis des objectifs considérés.**

Le résultat de GAMS indique que les échangeurs sont placés au niveau des procédés 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 10 et 12 ainsi que devant la sortie vers l'égout. La figure IV-14 présente le schéma plus détaillé du procédé 1. On constate que trois courants arrivent au mélangeur du procédé, chacun avec leur propre débit et leur température fixée.



**Figure IV-14. Schéma détaillé du procédé 1 avec un échangeur de chaleur. Les débits d'eau et les températures de chaque courant sont précisés ainsi que les caractéristiques propres au procédé.**

L'équation (25) permet de calculer l'aire d'un échangeur en fonction du flux énergétique qu'il doit fournir et de la différence de température entre l'entrée et la sortie (Biegler et al., 1997). On peut alors se rendre compte que si cette différence de température est élevée, l'aire sera d'autant plus faible. Il paraît donc judicieux de positionner l'échangeur sur le courant entrant qui possède le plus grand écart avec la température désirée. Dans le cas présent, ce sera le courant d'eau fraîche (figure IV-14) :

$$A = \frac{Q}{\Delta T \times U} \quad (25)$$

$$Q = m \times C_p \times \Delta T \quad (26)$$

où A, l'aire de l'échangeur considéré ( $m^2$ ), Q, la quantité d'énergie qu'il doit fournir (J) et U est le coefficient de transfert de chaleur. D'après Manan et al., (2009) la valeur de U est estimée à  $U=5678W/m^2K$ .  $C_p$  est la chaleur spécifique de l'eau et vaut donc  $1cal/Kg.^{\circ}C$  et  $\Delta T$  est la différence de température.

- La première étape consiste à calculer la température qu'atteint le courant le plus froid lorsque l'énergie Q lui est fournie, c'est la relation (26) qui permet de déduire la température à la sortie de l'échangeur. Avec les données du procédé 1, on obtient la température T avec  $T_1$  la température du courant d'eau fraîche fixée à  $30^{\circ}C$  et m vaut 46 :

$$T = \frac{Q}{m \times C_p} + T_1 \quad (27)$$

$$T = \frac{1104}{1 \times 46} + 30 = 54^{\circ}C \quad (28)$$

$54^{\circ}C$  est la température que le courant d'eau fraîche atteindra à sa sortie de l'échangeur. L'aire doit donc être calculée en conséquence.

- La seconde étape permet de calculer l'aire de l'échangeur selon la relation 25 :

$$A = \frac{1104 \times 4.18 \times 10^6 / 3600}{(54 - 20) \times 5678} = 6.7m^2 \quad (29)$$

L'échangeur est dimensionné et positionné au niveau du procédé 1 tel que le montre la figure 17.



Figure IV-15. Procédé 1 avec l'échangeur de chaleur positionné et dimensionné.

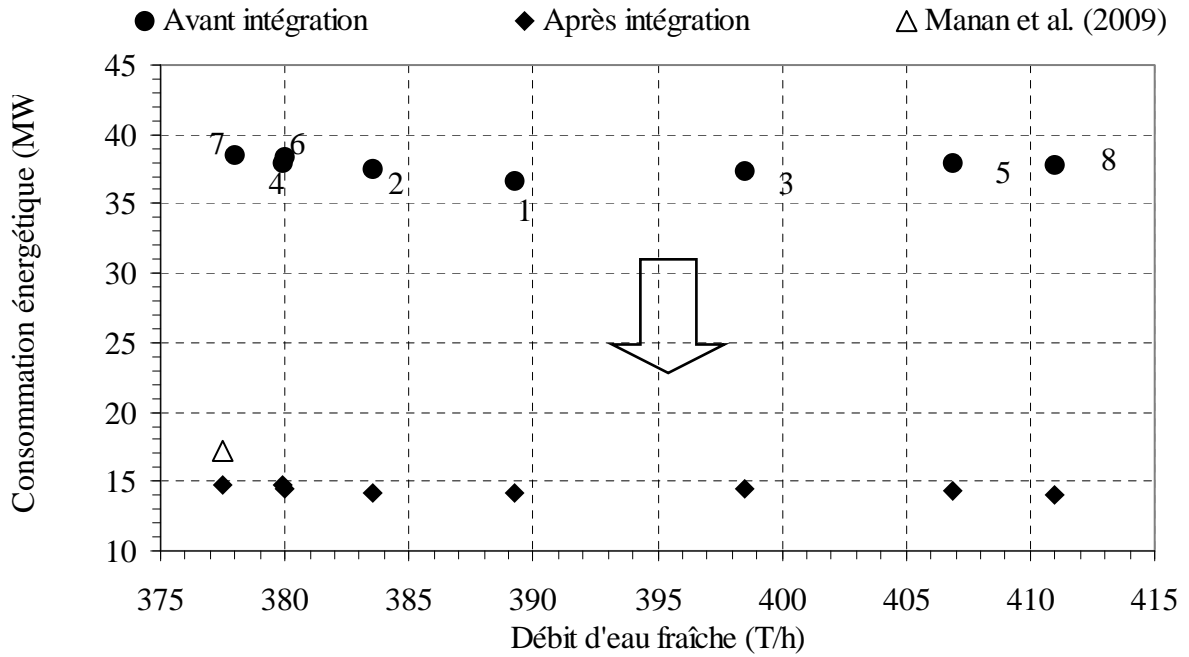
En utilisant cette méthode, l'utilisateur obtient un réseau acceptable et pouvant être mis en œuvre de façon judicieuse dans la pratique. Cette réflexion post-optimisation est indispensable dans le sens où elle permet non seulement un positionnement sur les différents courants mais aussi un dimensionnement de l'échangeur. En réalisant la même procédure sur les autres réseaux, il est par conséquent possible d'opter pour un réseau plutôt qu'un autre en considérant sa configuration finale plutôt que les consommations brutes. De plus, il est utile d'effectuer ce type de réflexion lorsque le réseau est déjà mis en place et que l'utilisateur souhaite l'optimiser a posteriori. Dans ce cas, il sera plus judicieux de choisir la solution nécessitant le moins de modifications par rapport à la configuration originale.

Une autre solution pour choisir parmi les 8 réseaux proposés permettant aussi d'améliorer la consommation d'énergie globale consiste à mener une intégration énergétique des solutions via un MINLP comme cela a été introduit dans la partie 2 de ce chapitre. Grâce à l'introduction de critères économiques, des décisions peuvent être prises.

### ***3.3 Intégration énergétique***

Les résultats obtenus sont numérotés de 1 à 8 pour la suite de l'analyse (Figure IV-13). Si un industriel devait mettre en œuvre l'un des 8 réseaux obtenus à l'étape 3.2, lequel choisirait-il et pourquoi ? Telle est la question que l'on doit se poser suite à une optimisation multiobjectif. Afin de proposer des solutions, la suite du travail propose une intégration énergétique des 8 réseaux restants afin d'améliorer leur consommation énergétique et de minimiser un critère économique. Dans cette partie, chaque réseau est ainsi décomposé en courants froids et chauds aux caractéristiques bien définies, de façon similaire à ce qui a été précédemment réalisé en 2.2b. La figure IV-16 montre les résultats obtenus suite à l'intégration énergétique en minimisant le critère économique donné par l'équation (31).

La consommation énergétique des réseaux se situe entre 14.07 et 14.74 MW, tandis que Manan et al. (2009) proposent un réseau consommant 17.22 MW pour 377.5 T/h d'eau. La méthode mise en œuvre dans cette étude est ainsi validée et permet d'obtenir des solutions déclassifiant les précédentes.



**Figure IV-16. Résultats de l'intégration énergétique des 8 réseaux. A titre de comparaison, le réseau obtenu par Manan et al. (2009) est aussi représenté.**

Dans cette partie, la même fonction coût est minimisée et les mêmes valeurs (Tableau IV-7) que dans la partie précédente sont utilisées pour le calculer :

$$\begin{aligned}
 \text{Coût} = & \sum_i \sum_j \sum_k C_{EC}(i, j) \times z(i, j, k) + \sum_i C_{EC}(i) \times z_{uf}(i) + \sum_j C_{EC}(j) \times z_{uc}(j) + \sum_i \sum_j \sum_k C_A(i, j) \times \\
 & A_{int}(i, j, k)^\beta + \sum_i C_A(i) \times A_{uff}(i)^\beta + \sum_j C_A(j) \times A_{ucc}(j)^\beta + f_a \left( \sum_i C_{uf}(i) \times qf(i) + \sum_j C_{uc}(j) \times qc(j) \right) + \\
 & \sum_j W_{1,j} \times C_{EF} + C_{con} \left( \sum_i \sum_{i^0 \neq i} \sum_k yf(i, i^0, k) + \sum_j \sum_{j^0 \neq j} \sum_k yc(j, j^0, k) \right)
 \end{aligned} \tag{31}$$

Les caractéristiques et les résultats des 8 réseaux optimisés via MINLP sous GAMS sont récapitulés dans le tableau IV-13. Le débit d'eau fraîche, le nombre de connexions, le nombre de courants froids et chauds, l'énergie consommée avant et après intégration, ainsi que les coûts d'après les valeurs de Dong et al. (2008) y sont regroupés. Dans les résultats du tableau IV-12, les chiffres en gras représentent la valeur minimale obtenue pour la caractéristique considérée. Par exemple, avant l'intégration énergétique, le réseau 1 était le mieux placé vis-à-vis de la consommation d'énergie tandis qu'après, c'est le réseau 8 qui

consomme le moins. Les études précédentes proposent toujours de se placer au minimum d'eau fraîche avant d'améliorer le critère énergétique, le réseau 7 serait ainsi choisi d'office. Cependant, il n'est pas le meilleur lorsque de nouveaux critères sont considérés : si le critère de coût est pris en compte, c'est le réseau 6 qui obtient le meilleur résultat.

<i>Réseau</i>	<i>EF (T/h)</i>	<i>Nombre de connexions</i>	<i>Courants chauds</i>	<i>Courants froids</i>	<i>Energie avant (MW)</i>	<i>Energie après (MW)</i>	<i>Coût (M\$)</i>
5	406.8	40	1	6	37.9	14,33	4.01
8	411	40	1	7	37.8	<b>14.07</b>	4.07
3	398.5	39	2	7	37.4	14.47	3.95
1	389.3	34	1	5	<b>36.6</b>	14.19	3.82
2	383.5	31	2	5	37.5	14.49	3.77
6	380	30	2	4	38.4	14.15	<b>3.64</b>
4	379.9	29	2	5	37.9	14.69	3.72
7	<b>377.5</b>	<b>27</b>	2	4	38.6	14.74	3.72

Tableau IV-13. Caractéristiques et résultats des intégrations énergétiques pour les 8 réseaux.

L'optimisation multiobjectif d'un exemple adapté d'un cas réel d'industrie a montré que plusieurs étapes sont nécessaires pour obtenir un ensemble de solutions optimales. Choisir le réseau à mettre en œuvre peut se révéler être un choix difficile mais ceci dépend essentiellement du critère minimisé. Dans le contexte environnemental actuel, un réseau consommant peu d'eau sera probablement la priorité, ce sera ainsi le réseau 7 qui sera favorisé. Cela dit, en augmentant le débit d'eau fraîche de seulement 2.5 T/h, le coût prend une valeur minimale et la consommation énergétique se place en deuxième position. Contrairement aux études antérieures dans lesquelles le réseau 7 aurait été directement retenu, ici, le choix du réseau 6 représente une bonne alternative lorsque l'on considère plusieurs objectifs simultanément. Ce réseau présente aussi l'avantage d'être relativement simple puisqu'il ne comporte que 30 connexions au total, la configuration du réseau d'eau est représentée sur la figure IV-17 et le réseau d'échangeurs de chaleur associé est présenté sur la figure IV-18.

#### 4. Conclusion

Ce chapitre a permis d'optimiser des réseaux d'eau et de chaleur monopolluants selon plusieurs objectifs de façon simultanée. Cette nouvelle méthode est innovante dans le sens où des solutions optimales différentes de celles avancées dans les travaux antérieurs sont

proposées et offrent de meilleurs compromis vis-à-vis des critères choisis. Le fait de traiter ce type de problème en considérant plusieurs objectifs met en exergue l'importance de ne pas se limiter à une seule solution (souvent le minimum d'eau fraîche) avant de traiter le problème posé par la chaleur. La résolution du problème d'allocation sous la forme d'un programme MILP permet de traiter des réseaux importants sans causer de difficultés liées au calcul numérique. En effet, l'exemple réel de l'industrie papetière a été optimisé avec de très faibles temps de calcul. Cette première étape engendre un ensemble de fronts de Pareto offrant les solutions prétendantes soit à une analyse post-optimisation, soit à une intégration énergétique. La première mène à un positionnement et un dimensionnement des échangeurs de chaleur sans passer par des calculs numériques intermédiaires. L'intégration énergétique, permet quant à elle, d'améliorer le résultat obtenu lors de la phase d'allocation en ce qui concerne la consommation d'énergie tout en minimisant une fonction coût donnée, à l'aide d'une méthode de type MINLP. Le réseau obtenu suite à l'intégration énergétique pour l'industrie papetière Malaisienne offre un gain de 21% par rapport à ce qui avait été proposé par les précédents auteurs ayant traité ce cas (Manan et al., 2009)



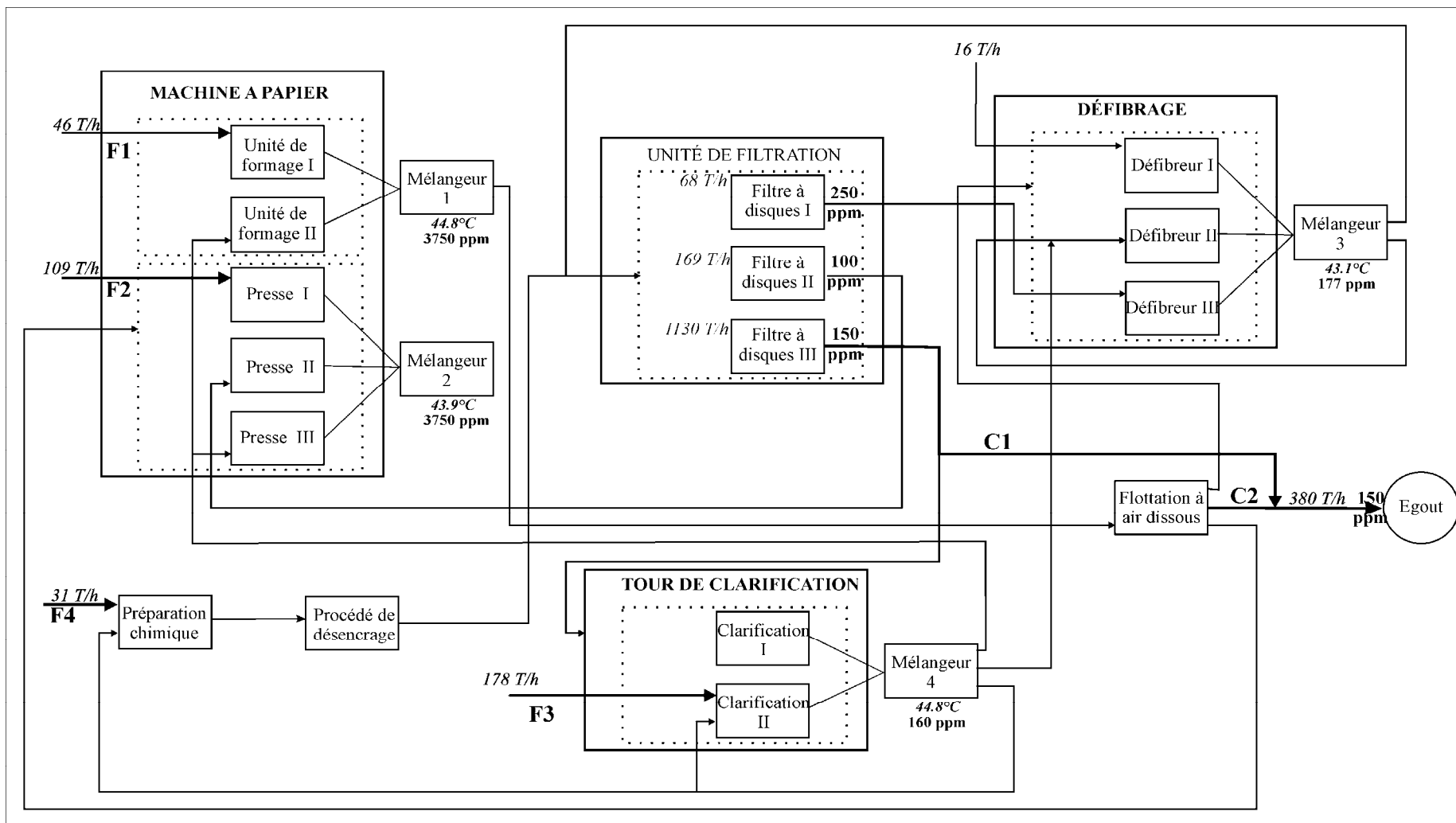


Figure IV-17. Schéma du réseau d'eau choisi (réseau n°6) consommant 380 T/h d'eau.

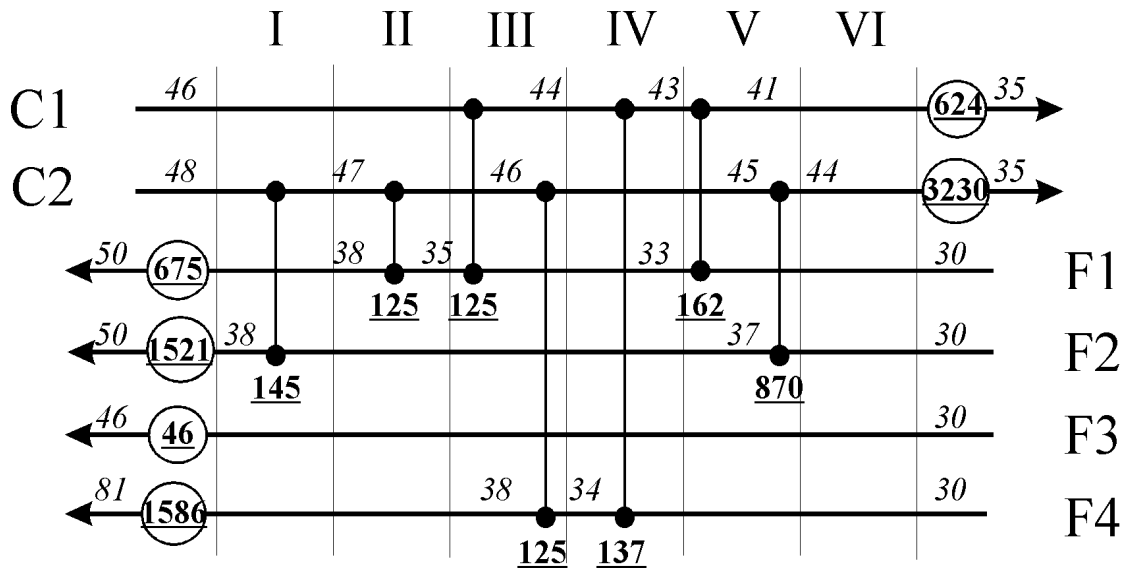


Figure IV-18. Réseau d'échangeurs de chaleur intégré au réseau d'eau n°6.  
 Les chiffres en italiques représentent les températures, les chiffres en gras et soulignés sont les flux énergétiques exprimés en KW.

---

---

*Chapitre V – Optimisation de réseaux  
d'eau dans un cadre d'écologie  
industrielle : application aux éco-parcs*

---

---

## Nomenclature du chapitre

$yp^{j \rightarrow k}$	variable binaire associée à la présence du courant circulant du procédé i vers le procédé j
$yrp^{l \rightarrow j}$	variable binaire associée à la présence du courant circulant de l'unité de régénération l vers le procédé j
$ypr^{j \rightarrow l}$	variable binaire associée à la présence du courant circulant du procédé j vers l'unité de régénération l
$F_1$	débit d'eau fraîche entrant dans le réseau (T/h)
$F_2$	débit d'eau régénéré (T/h)
$F_w$	débit d'eau rejeté à la décharge (T/h)
$NCE$	nombre de connexions équivalent
$CEG$	cout équivalent global (T/h)
$EIP$	parc éco-industriel

Il est communément répandu dans les esprits qu'écologie et activités industrielles sont des notions antinomiques. Cependant, les écologistes industriels voient les systèmes industriels comme un type particulier d'écosystèmes. En effet, les premières références à l'écologie remontent jusqu'en 1749 où Linnaeus se réfère à l'écologie en tant qu' « économie de la nature » (Worster, 1977).

Durant ces dix dernières années, la majorité des pays industrialisés ont largement investi dans la recherche sur l'environnement grâce à une prise de conscience générale concernant l'appauvrissement des ressources naturelles (UNESCO, 2009). Dans le cadre de l'eau douce, il existe ainsi un réel besoin de diminuer cette consommation en redéfinissant des réseaux d'eau industriels propres de façon à ce qu'ils réduisent leur impact sur l'environnement. C'est en réponse à ces problèmes environnementaux que le terme d'écologie industrielle et tout ce qu'il implique est né. C'est avec l'étude de Frosch and Gallapoulos en 1989 que la communauté scientifique a commencé à s'intéresser de très près au regroupement d'industries dans un but commun de développement durable. Le terme anglais d' « ecopark » est alors apparu, se traduisant en français par parc éco-industriel. De nombreux exemples ont commencé à voir le jour dans la pratique depuis ces travaux avec notamment le fameux exemple des pionniers du Danemark avec la symbiose industrielle de Kalundborg qui fait ses preuves depuis maintenant près de 20 ans (1990). D'autres fructueux exemples, toujours plus nombreux, voient à présent le jour partout dans le monde. Cependant, dans la majorité des cas relatifs à l'agro-alimentaire, c'est surtout l'échange de matières qui est concerné en évitant des transports et les séchages attachés.

La première partie de ce chapitre a pour but de développer le concept d'écologie industrielle ainsi que les travaux qui ont été menés sur le sujet durant les deux dernières décennies. La méthodologie appliquée pour optimiser un groupement de réseaux d'eau est similaire à ce qui a été réalisé dans ce manuscrit dans le cas monopolluant, mais quelques ajustements doivent être apportés au niveau des contraintes. C'est toujours dans un cadre multicritère que cette étude est menée en minimisant la consommation d'eau fraîche, le nombre de connexions et cela en étudiant des cas où les unités de régénération sont placées différemment. Ce sont ces études de cas qui permettent de proposer une réelle solution pour la mise en œuvre d'un tel parc à l'aide d'une programmation linéaire, toujours intéressante en termes de fiabilité et de temps de calcul qu'une approche non linéaire de type MINLP.

## 1. Travaux antérieurs dans le domaine de l'écologie industrielle

Bien que la naissance de l'écologie industrielle soit souvent attribuée à Frosch et Gallopoulos (1989), les premières études remontent en réalité à la deuxième moitié du XIX<sup>ème</sup> siècle. La notion de symbiose industrielle se retrouve déjà à la fin des années 1800 quand Simmonds (1862) décrit une utilisation potentielle des déchets par d'autres industries et établit un recensement des progrès réalisés à ce sujet sur près d'un quart de siècle (1876). Ensuite, au début du XX<sup>ème</sup> siècle, Conover (1918) étudie la récupération et l'utilisation des déchets par d'autres entreprises, alors que Koller et Stocks (1918) s'intéressent plus spécifiquement à la réutilisation des papiers usés. Les premières manifestations de rassemblement éco-industriel sont dévoilées par l'étude de Clement en 1927. Dans ce rapport, il décrit comment les produits secondaires sont utilisés dans une conserverie de viande : des groupes entiers de petites usines évoluent en symbiose autour de cette conserverie.

Durant les années 1960, l'idée d'une symbiose industrielle comparable à une symbiose biologique commence à émerger, ainsi que les premières publications sur le sujet. Parmi les pionniers figurent Odum, sans doute à l'origine du terme d'écologie industrielle, ainsi que d'autres auteurs tels que Hall (1975) aux Etats Unis, Billen et al. (1983) en Belgique, et finalement Frosch et Gallopoulos (1989), dont les travaux représentent vraisemblablement le fondement des études appliquées aux parcs éco-industriels.

Durant les vingt dernières années, de nombreux termes et concepts ont émergé dans le vaste domaine de l'écologie industrielle. On retrouve entre autres : « écosystèmes industriels », « métabolisme industriel », « symbiose industrielle » ainsi que des termes tels que « parc éco-industriel », « réseau éco-industriel », ou encore « éco-parc ». Les réseaux éco-industriels regroupent des réseaux divers allant de relations très limitées (par exemple lorsque l'eau chaude d'une industrie est utilisée pour le chauffage des habitations adjacentes) à des écosystèmes industriels complexes dans lesquels des infrastructures, habitations et produits sont conçus de manière à fonctionner de façon cyclique (Chertow, 2000 ; Allenby, 2006). Le terme « parc éco-industriel », (eco-industrial park, EIP) est utilisé pour décrire la quasi-totalité des types de communautés économiques regroupant des caractéristiques écologiques et situés dans les limites d'un parc industriel traditionnel (Chertow, 2007 ; Côté, 2008). Lowe et al. (1996) proposent comme définition d'un parc éco-industriel « tout regroupement d'industries cherchant à améliorer leurs performances environnementales et économiques à travers une

collaboration dans la gestion des ressources incluant l'énergie, l'eau et les matériaux ». Cette définition stipule également qu' « en travaillant ensemble, la communauté recherche un bénéfice commun supérieur à la somme des bénéfices individuels que chaque industrie aurait gagné si elle fonctionnait seule ». Un parc éco-industriel peut alors être défini comme un réseau constitué d'entreprises qui coopèrent pour optimiser leur usage des ressources primaires, le recyclage de leurs déchets ainsi que le traitement des eaux usées (Liwarska-Bizukojc et al., 2009). Il s'agit en quelque sorte d'un ensemble de procédés faisant partie ou non de la même entreprise et qui interagissent en permanence. Une condition *sine qua non* pour qu'un parc éco-industriel soit économiquement viable est que les bénéfices obtenus par chacune des industries incluses dans le parc doivent être au moins supérieurs à ceux qui auraient été générés en fonctionnant de façon indépendante. Bien sûr, d'autres conditions sont nécessaires pour assurer la viabilité d'un tel parc qui se doit d'assurer (Lowe, 1997) :

- l'inter-connexion des industries dans une zone géographiquement limitée
- la conception de boucles de recyclage et de réutilisation des eaux usées
- la maximisation et la réutilisation de l'énergie et de l'eau
- la minimisation de la quantité de déchets produits
- La valorisation des déchets comme produits utilisables dans une autre industrie
- l'équilibrage des entrées et sorties du parc avec l'écosystème naturel environnant
- la réduction de l'impact environnemental
- la re-conception des procédés devant mieux s'intégrer à l'EIP.

Sans tomber dans le piège de discours écologiques abstrus, il est évident que sous le vaste terme d'écologie industrielle de nombreux problèmes sociétaux et/ou industriels apparaissent (Côté et Cohen-Rosenthal, 1998 ; Cohen-Rosenthal, 2000 ; Tudor et al., 2007). En complément des relations symbiotiques traitant des ressources et des matériaux, il est important de proposer des réseaux annexes de transport, de formation du personnel, d'informations et de communication au sein de l'EIP.

De nombreux exemples sont désormais disponibles partout dans le monde. Un exemple notable en la matière et déjà mentionné plus haut est le parc éco-industriel de Kalundborg au Danemark qui a exploré 24 symbioses différentes sur une période de plus de 30 ans (Ehrenfeld and Gertler, 1997 ; Jacobsen, 2006). Les entreprises incluses au sein de ce parc regroupent différentes industries comme une centrale électrique, une raffinerie de

pétrole, une cimenterie, une usine de placoplâtre, une compagnie pharmaceutique, une pisciculture et le chauffage de la ville de Kalundborg. Ce parc est devenu un modèle pour de nombreux autres en voie de construction, une illustration en est donnée sur la figure V-1.

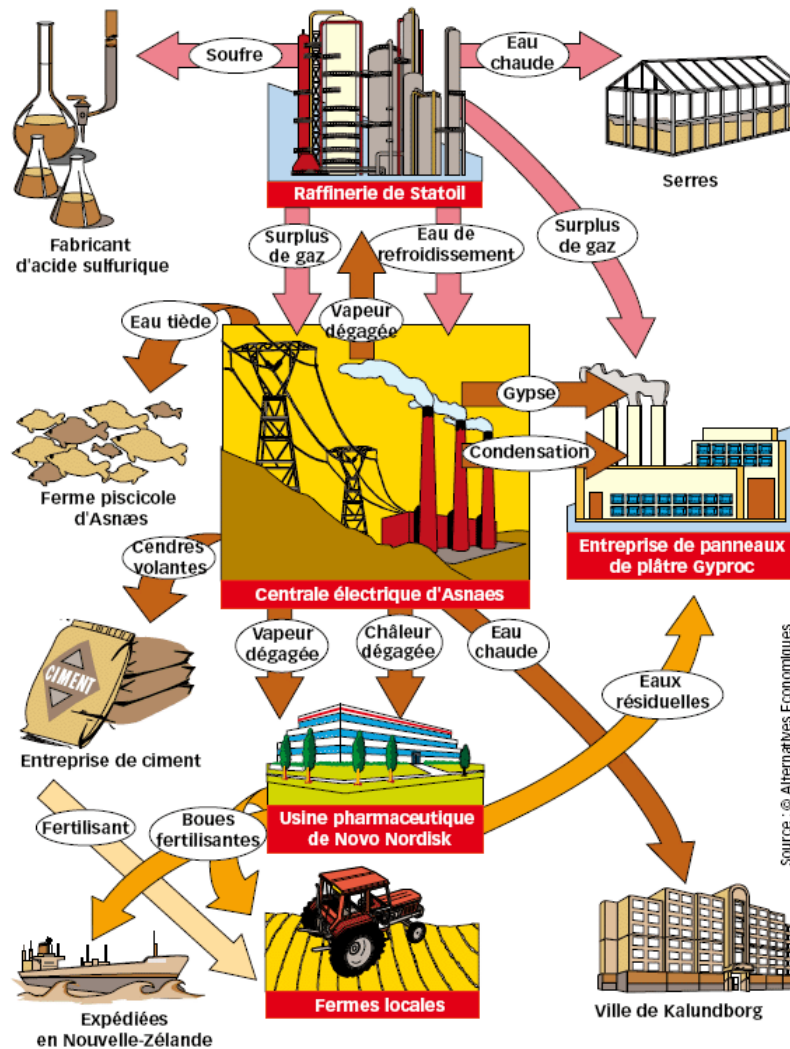


Figure V-1. Symbiose industrielle de Kalundborg.

La plupart ont vu le jour dans les pays industrialisés d'Amérique du Nord (Côté et Cohen-Rosenthal, 1998; Gibbs et Deutz, 2005, 2007, Heeres et al., 2004), d'Europe (Baas et Boons, 2004; Heeres et al., 2004; Mirata, 2004; Van Leeuwen et al., 2003), ou encore en Australie (Roberts, 2004; Van Beers et al., 2007; Van Berkel, 2007; Giurco et al., 2010). Plus récemment, c'est dans les pays en cours d'industrialisation que de nombreux parcs naissent. Des pays tels que la Chine (Geng et Hengxin, 2009; Liu et al., 2010 ; Shi et al., 2010), le



Brésil (Veiga et al., 2009) ou enfin la Corée (Oh et al., 2005; Park et al., 2008) sont des témoins de ce développement.

La conception d'un EIP dans le but de minimiser les ressources primaires (principalement l'eau) est abordée par des procédures de programmation mathématique en utilisant une méthode NLP ou MINLP (Aviso et al., 2010a, 2010b ; Chew et al., 2008, 2010a, 2010b ; Lovelady et El-Halwagi, 2009 ; Kim et al., 2010). La complexité majeure du problème vient ici de la difficulté à gérer plusieurs critères antagonistes simultanément (Erol et Thöming, 2005). Récemment, quelques stratégies ont été mises en œuvre pour pallier ce problème : l'implémentation d'une optimisation basée sur la théorie des jeux (Chew et al., 2009, 2010c), ou une optimisation à deux étapes fondée sur la logique floue (Aviso et al., 2010a, 2010b). Ces approches sont limitées à l'optimisation de deux objectifs pris en compte de façon séquentielle et non simultanée. Les objectifs les plus communs pour ce type de problème sont la consommation d'eau fraîche et la satisfaction des participants (Lim et Park, 2008). Des études récentes se sont penchées sur le développement d'indicateurs visant à évaluer la satisfaction des différents participants de l'EIP (Tiejun, 2010 ; Zhu et al., 2010).

Même si de nombreux exemples réels fonctionnent, ce type de symbiose doit faire face à deux défis majeurs pour que leur développement soit viable. Le premier est de type technico-économique : si les échanges parmi les participants du parc ne sont pas réalisables, le parc ne peut pas fonctionner. Aussi faut-il nécessairement un véritable lien entre les industries du parc. Le second défi est lié à la stratégie commerciale qui peut représenter un frein au développement d'un réseau symbiotique. Nous admettons que ces deux conditions sont réunies pour que la mise en œuvre du parc puisse avoir lieu. Le but ici est, dans un premier temps, de concevoir un réseau d'eau intégré au sein d'un éco-parc. L'étude est ensuite élargie à la conception d'un réseau d'eau et d'énergie d'un parc éco-industriel.

## **2. Optimisation d'un réseau d'eau d'un parc éco-industriel**

### ***2.1 Définition du problème***

Dans les chapitres précédents, une méthode de conception de réseaux d'eau ainsi que de réseaux d'eau et d'énergie a été validée en se basant sur des exemples de la littérature (Bagajewicz et Savelski, 2001, Feng et al., 2008, Savelski et Bagajewicz, 2003, Manan et al.,

2009). La procédure est désormais étendue aux parcs éco-industriels (EIP) dont la superstructure générale est illustrée ci-dessous dans le cas de trois entreprises (Figure V-2).

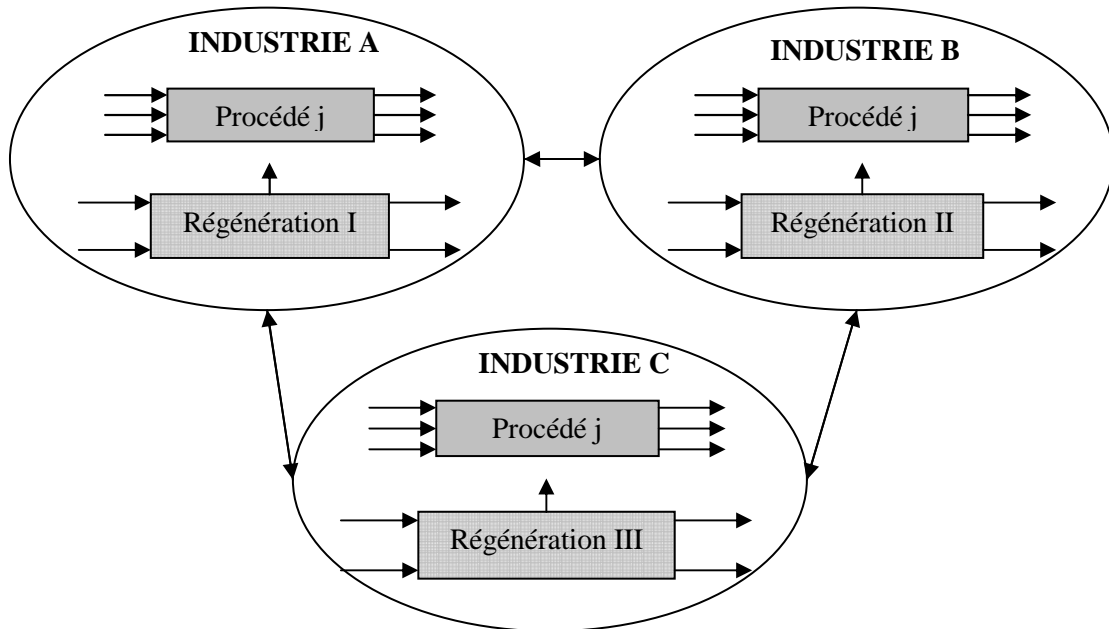


Figure V-2. Superstructure d'un EIP (représenté avec 3 industries).

La formulation du problème reste identique à celle exposée dans le chapitre 2 : les équations et contraintes sont linéaires tout en respectant les conditions d'optimalité données par Savelski et Bagajewicz (2001). La principale difficulté pour l'adaptation du problème au cas des éco-parcs vient du nombre de variables qui augmente considérablement. Cependant, le fait d'avoir opté pour une approche par programmation mathématique et surtout d'utiliser une procédure de type MILP/LP constitue un avantage important par rapport aux autres méthodes de résolution. En l'occurrence, la linéarité permet de déterminer des solutions optimales en des temps de calculs très réduits, généralement inférieurs à la minute, et de plus les problèmes d'initialisation ne se posent pas.

Les équations sont identiques à celles proposées dans la partie 3 du chapitre 2. Seules quelques contraintes sont ajoutées pour ce problème ; elles concernent les échanges entre les différentes industries du parc. L'exemple considéré ci-après regroupe trois entreprises, chacune composée de cinq unités de procédé indicées par j et, selon les cas, une unité de régénération. Ainsi, l'industrie A inclut les procédés 1 à 5, l'industrie B les procédés 6 à 10 et enfin, l'entreprise C contient les procédés 11 à 15. La contrainte additionnelle consiste à admettre qu'entre chaque industrie, seuls deux courants inverses peuvent être échangés. Cela

signifie que l'industrie A ne doit posséder que deux connexions avec l'industrie B (un courant de A vers B (1) ; et un autre de B vers A (2)) au maximum.

$$\sum_{i=1}^5 \sum_{j=6}^{10} yp^{i \rightarrow j} + \sum_{j=6}^{10} yrp^{1 \rightarrow j} + \sum_{i=1}^5 ypr^{i \rightarrow 2} = 1 \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^5 \sum_{j=6}^{10} yp^{j \rightarrow i} + \sum_{j=6}^{10} yrp^{j \rightarrow 1} + \sum_{i=1}^5 ypr^{2 \rightarrow i} = 1 \quad (2)$$

Le nombre d'échanges externes est ainsi fixé à deux pour chaque industrie dans cette étude mais peut être modifié si la configuration géographique du parc le permet. Généralement, cette contrainte se justifie pour des raisons de topologie et de simplification du parc final. En effet, une brève évaluation de l'impact économique des connexions peut expliquer ce choix.

Considérons une industrie individuelle composée de cinq unités de procédé, une unité de régénération et huit connexions. On fait l'hypothèse qu'un même débit de 23.25 T/h circule dans chaque courant. Le coût des connexions est calculé selon Chew et al. (2008) avec une longueur moyenne des canalisations de 50 m, un taux d'intérêt de 5% sur une période de 5 ans et le coût de l'eau fraîche fixé à 0.1 €/T (coût de l'eau de rivière). Le rapport calculé [Coût des connexions/ Coût de l'eau fraîche] est de 14%. Ainsi, même en incluant un nombre de connexions très limité (huit étant le minimum possible), cet exemple montre, d'un point de vue économique, l'utilité de prendre en compte le critère du nombre de connexions. Il est important de noter, que dans le cas particulier d'un EIP, les connexions externes (entre industries) n'ont pas le même coût que les connexions internes. En effet, elles sont beaucoup plus longues, et peuvent atteindre un facteur multiplicatif de 10 dans certains cas. Ceci a pour effet d'augmenter de façon significative le rapport [Coût des connexions/ Coût de l'eau]. Les contraintes (1) et (2), énoncées plus haut, prennent alors tout leur sens.

## ***2.2 Stratégie d'optimisation multiobjectif***

L'originalité de cette étude consiste à traiter le problème d'EIP à l'aide d'une formulation linéaire, de la même manière que dans les chapitres précédents. A cela s'ajoute une optimisation selon plusieurs objectifs, car le regroupement d'industries doit forcément passer par ce type de résolution puisque de nombreux critères sont impliqués.

Comme dans les chapitres précédents, trois objectifs sont considérés :

- $F_1$  : l'eau fraîche permettant d'alimenter le parc.

- $F_2$  : lorsque les unités de régénération sont utilisées, le débit d'eau régénérée est considéré.
- $F_3$  : le nombre total de connexions, introduit en tant que contrainte égalité.

Il est important de prendre en compte simultanément de ces trois objectifs au lieu de les regrouper dans une unique fonction coût, comme il est souvent le cas. En effet, la minimisation d'une seule fonction coût conduit à une seule et unique solution, tandis que le fait de prendre en compte trois objectifs mène à des fronts de Pareto et donc, à un ensemble de solutions possibles, mathématiquement aussi bonnes les unes que les autres. Ceci est fondamental pour proposer une procédure d'aide à la décision et ne pas limiter l'étude à une solution qui n'est pas forcément optimale au regard d'autres critères. En outre, cette méthode mise en œuvre présente l'avantage d'être universelle car elle permet d'exploiter les résultats différemment selon la région géographique (différents coûts) ou selon le type de critère à privilégier. La stratégie d'optimisation multiobjectif utilisée ici est identique à celle mise en œuvre dans le chapitre 2. Elle consiste à fixer  $F_3$  et à mener des optimisations bicritères [ $F_1$ ,  $F_2$ ] selon la méthode  $\epsilon$ -contrainte, pour chaque valeur fixée de  $F_3$ .

C'est ensuite parmi les solutions de Pareto qu'un tri est effectué à l'aide des deux indicateurs économiques présentés dans cette étude, afin de proposer le choix du meilleur compromis:

- **Le CEG** (cout équivalent global, défini au Chapitre 2), exprimé par la relation suivante :

$$CEG = F_1 + \alpha \times F_2 + \beta \times F_w \quad (3)$$

Les valeurs de  $\alpha$  dépendent du type d'unité de régénération choisie (Tableau V-1) et  $\beta$  est estimé à 5.625 (Bagajewicz et Faria, 2009).

<i>Type d'unité de régénération</i>	<i>Concentration post-régénération (ppm)</i>	<i><math>\alpha</math></i>
I	50	0.375
II	20	1.75
III	5	3.125

**Tableau V-1. Valeurs du paramètre  $\alpha$  en fonction de l'unité de régénération.**

- **Le NCE** (nombre de connexions équivalent) : nous supposons que la distance entre les industries est fixée et que le coût des connexions externes entre entreprises est divisé par deux (50% pour chaque entreprise) :

$$NCE = \text{nombre de connexions internes} + 0.5 \times \text{nombre de connexions externes} \quad (4)$$

La valeur du NCE reflète les coûts d'investissement et de pompage ainsi que l'infrastructure associée au réseau étudié. Les solutions viables pour l'EIP sont donc sélectionnées *a posteriori* en calculant la valeur du couple [CEG, NCE] pour chaque entreprise et pour les différents cas étudiés.

Enfin, un critère technique permet d'affiner le choix selon le couple [CEG, NCE]. Si la solution retenue comporte au moins une connexion avec un débit d'eau inférieur ou égal à une valeur seuil (fixée à 2T/h), la solution est écartée et la suivante dans le classement est considérée.

### ***2.3 Présentation de l'EIP étudié***

Lorsqu'un regroupement d'industries est envisagé, il est important de se poser les questions suivantes : chaque industrie doit-elle investir dans une unité de régénération ? Est-ce plus avantageux de posséder une unité de régénération commune ? Comment le réseau d'eau global de l'EIP doit-il être construit de manière à ce que les industries profitent toutes d'un tel regroupement ?

Afin de répondre à ces questions, trois configurations différentes sont étudiées en vue de montrer l'utilité de ce type de symbiose et nous verrons, *a posteriori*, que toutes les configurations ne sont pas nécessairement intéressantes. Les configurations sont décrites ci-dessous :

- Les entreprises collaborent entre elles sans utiliser d'unité de régénération, qu'elle soit individuelle ou collective (Figure V-3a).
- Les entreprises investissent chacune dans une unité de régénération (Figure V-3b).
- Une seule unité de régénération commune est utilisée par l'EIP (Figure V-3c).

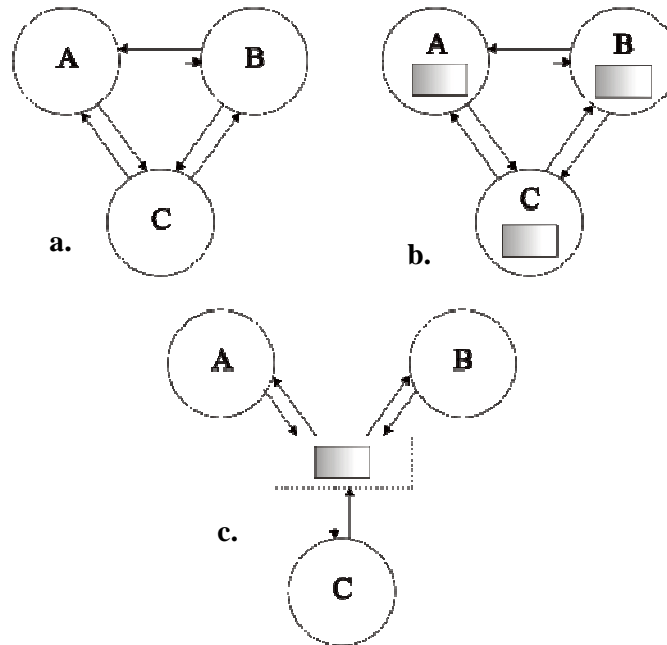


Figure V-3. Différentes configurations pour le positionnement de l'unité de régénération.

La conception des EIP pour la gestion des eaux et énergies industrielles est illustrée par l'exemple proposé par Olesen et Polley (1996). Rappelons que le parc est composé de trois entreprises impliquant chacune cinq unités de procédés. De manière analogue aux problèmes de réseaux d'eau pour une seule entreprise, chaque industrie de l'EIP doit être parfaitement définie, en terme de charge de polluant (supposé unique dans cette étude). Les charges en polluant entrant dans chacune des unités de procédés ainsi que leurs concentrations maximales autorisées en entrée et en sortie sont connues (Tableau V-2). Comme dans les exemples précédents, le logiciel GAMS est utilisé pour résoudre le problème MILP à l'aide du solveur CPLEX. Rappelons que la contrainte concernant l'interdiction de la présence de faibles débits est également incluse au programme, ce qui permet de construire des réseaux n'incluant pas de débits inférieurs à 2 T/h. En fait, la contrainte technique concernant les débits mentionnée ci-dessus fait partie de la formulation du problème et est donc vérifiée pour chaque solution générée.

Selon le tableau V-1, trois types d'unités de régénération sont disponibles. Pour chacune des configurations envisagées, deux types de contraintes sont étudiées, d'une part le nombre de connexions et d'autre part, les bénéfices relatifs de chaque entreprise. L'objectif est alors d'identifier la meilleure stratégie pour que chaque entreprise puisse minimiser les valeurs du CEG et du NCE. Ainsi, pour chaque cas, le gain par rapport à un cas de base est

retenu s'il est positif pour le CEG. Lorsque deux solutions possèdent la même valeur de gain du CEG, c'est alors le réseau possédant le NCE le plus faible qui est retenu.

<i>Entreprise</i>	<i>Procédé</i>	<i>Charge en polluant (g/h)</i>	<i>Concentration maximale d'entrée (ppm)</i>	<i>Concentration maximale de sortie (ppm)</i>
A	1	2000	0	100
	2	2000	50	80
	3	5000	50	100
	4	30000	80	800
	5	4000	400	800
B	6	2000	0	100
	7	2000	50	80
	8	5000	80	400
	9	30000	100	800
	10	4000	400	1000
C	11	2000	0	100
	12	2000	25	50
	13	5000	25	125
	14	30000	50	800
	15	15000	100	150

**Tableau V-2. Données limitantes pour le parc éco-industriel étudié.**

Les résultats du travail réalisé dans cette partie sont présentés dans des différents tableaux où les valeurs des différents objectifs sont récapitulées. Etant donné que le système est très contraint, les fronts de Pareto ne sont pas représentés puisque relativement peu de solutions existent dans chacune des configurations proposées. Pour chacune d'entre elles, plusieurs cas sont explorés et récapitulés dans le tableau V-3 afin de faciliter la compréhension du lecteur. Les cas en italiques (1 et 5) ne sont pas des EIP, mais représentent les cas de base servant de base de comparaison dans la suite de l'étude.

<i>Configuration</i>	<i>Cas</i>	<i>Description des contraintes</i>
<b>Cas de base (sans EIP)</b>	Cas 1	<i>Les industries ne sont pas incluses dans un EIP, elles n'ont aucun lien avec les autres et n'ont pas d'unité de régénération</i>
	Cas 5	<i>Les industries n'ont aucun lien avec les autres et ont leur propre unité de régénération</i>
<b>EIP sans unité de régénération</b>	Cas 2	Le nombre de connexions est laissé libre
	Cas 3	Le nombre de connexions est fixé au minimum faisable (21)
	Cas 4	Le nombre de connexions est restreint au minimum (21) et chaque industrie doit avoir le même gain
<b>EIP avec unités de régénérations individuelles (Intégration directe)</b>	Cas 6	Le nombre de connexions est laissé libre
	Cas 7	Le nombre de connexions est fixé au minimum faisable (26)
	Cas 8	Le nombre de connexions est restreint au minimum (26) et chaque industrie doit avoir le même gain
<b>EIP avec une unité de régénération commune (Intégration indirecte)</b>	Cas 9	L'EIP possède un intercepteur avec une unité de régénération de type I
	Cas 10	L'EIP possède un intercepteur avec une unité de régénération de type I et le nombre de connexions externes est limité à 2
	Cas 11	L'EIP possède un intercepteur contenant des unités de régénération de types I, II et III
	Cas 12	Idem que le cas 11 avec le nombre de connexions limité à 26 et chaque industrie doit avoir le même gain
	Cas 13	Idem que le cas 11 avec le nombre de connexions limité à 31 et chaque industrie doit avoir le même gain

Tableau V-3. Caractéristiques des configurations et cas étudiés.

#### **2.4 Etude des cas de base (1 et 5) : entreprises sans lien avec les autres**

Les résultats de ces deux études sont illustrés sur la figure V-4. Les fronts de Pareto sont représentés selon les valeurs des deux objectifs  $F_1$  et  $F_2$ . Lorsque  $F_2$  est égal à zéro la configuration revient à un débit d'eau régénérée nul, ce qui équivaut au cas 1.

Le cas 5 revient à optimiser chaque industrie de manière individuelle. Pour chacune d'entre elles, les fronts de Pareto sont tracés en laissant le choix de l'unité de régénération (I, II ou III). Chaque valeur de  $\alpha$  (équation 3 et Tableau V-1) est introduite en tant que contrainte pour permettre à l'optimiseur de choisir l'unité de régénération adéquate pour chaque entreprise. Selon cette stratégie, les unités de régénération de type I sont choisies pour les



industries A et B et celle de type II est la plus adaptée à l'industrie C. Ainsi, les débits d'eau fraîche minimaux de chaque industrie (A, B et C) valent 20 T/h pour le cas 5 avec des débits d'eau régénérée variables selon les industries (Figure V-4). Pour le cas 1, soit sans unité de régénération, les débits d'eau fraîche minimaux sont plus importants : 98.3, 54.6 et 190 T/h pour les industries A, B et C, respectivement (points cerclés sur la figure V-4).

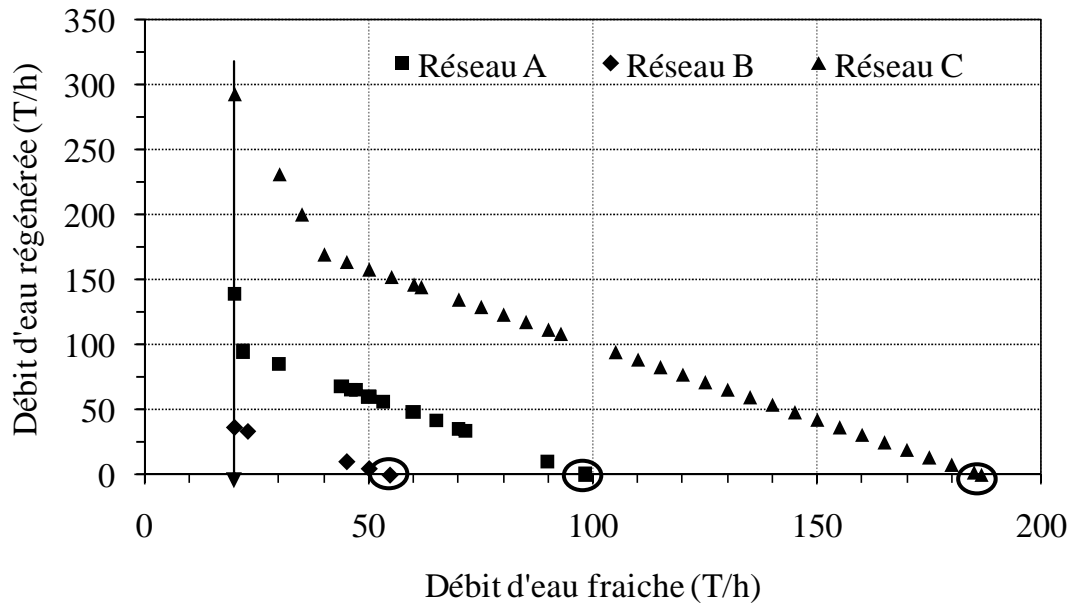


Figure V-4. Résultats de l'optimisation bicritère pour les cas 1 et 5.

Les résultats pour le cas 5 sont donnés pour l'unité de régénération que chacune des industries a choisie. Enfin, la minimisation du nombre de connexions (NCE) et du CEG aboutit aux résultats présentés dans le tableau 4 pour les deux cas de base sans EIP.

	<i>Cas 1</i>		<i>Cas 5</i>	
	Minimum du NCE	Minimum du CEG	Minimum du NCE	Minimum de CEG
A	6	651	8	195
B	8	362	8	157
C	7	1259	10	469
<b>Total</b>	<b>21</b>	<b>2272</b>	<b>26</b>	<b>821</b>

Tableau V-4. Résultats de la minimisation du nombre de connexions pour les cas de base (1 et 5).

Pour les cas de base, les résultats obtenus sont ceux attendus. En effet, si les industries fonctionnent de façon individuelle et s'équipent chacune d'une unité de régénération, elles

réduisent largement leur consommation d'eau, avec un CEG divisé par 3 en moyenne pour chaque entreprise. Cependant, l'ajout d'une unité de régénération a pour effet d'augmenter le nombre minimal de connexions qui passent de 21 à 26 au total.

A titre indicatif, le réseau optimal de l'industrie A pour le cas 1 est illustré par la figure V-5. Elle consomme 98.3 T/h d'eau fraîche, comporte 6 connexions (hormis celles allant à la décharge) et n'inclut pas de débits inférieurs à 2 T/h.

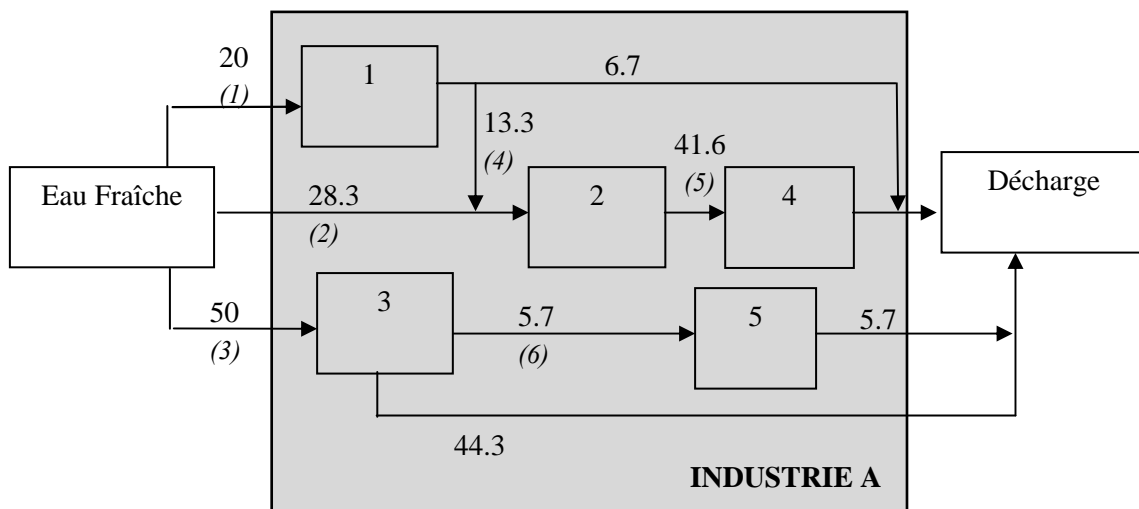


Figure V-5. Réseau optimal de l'industrie A pour le cas de base 1 (les débits sont exprimés en T/h et les numéros de connexions sont entre parenthèses).

### 2.5 Parc éco-industriel sans unités de régénération (Cas 2, 3 et 4)

Dans ce paragraphe, on suppose que les trois entreprises n'ont aucune unité de régénération et décident de constituer un EIP sans unité de régénération commune. Les flux d'eaux générés par une entreprise peuvent être utilisés en son sein ou envoyés soit à une ou deux autres entreprises, soit à l'égout. Pour réaliser cet EIP avec la gestion la plus performante possible, il est nécessaire d'étudier l'impact de chacune des contraintes sur les résultats. Voici le rappel des différents cas étudiés, cas 2 à 4 (Tableau V-3) :

- **Le cas 2** représente l'option selon laquelle les trois industries décident de se rassembler au sein d'un EIP sans unité de régénération. Elles s'autorisent ici un nombre illimité de connexions internes.

- **Le cas 3** ne diffère du cas précédent que par le nombre de connexions qui est désormais limité à 21, minimum obtenu pour le cas 1 (Tableau V-4).
- **Le cas 4** implique également un nombre de connexion maximal limité à 21 et impose que les bénéfices liés au regroupement soient identiques pour chaque entreprise. Cette condition est souvent considérée dans les éco-parcs puisqu'il est difficile d'imaginer que le réseau d'eau optimisé pour les entreprises de l'EIP leur profite de manière inégale. Cette contrainte prend tout son intérêt dans le cas où les trois entreprises font partie de compagnies différentes. Dans le cas où une seule compagnie détiendrait les trois entreprises, on pourrait imposer comme contrainte que la somme des gains des trois entreprises soit positive, c'est-à-dire que le gain global pour la compagnie mère soit positif.

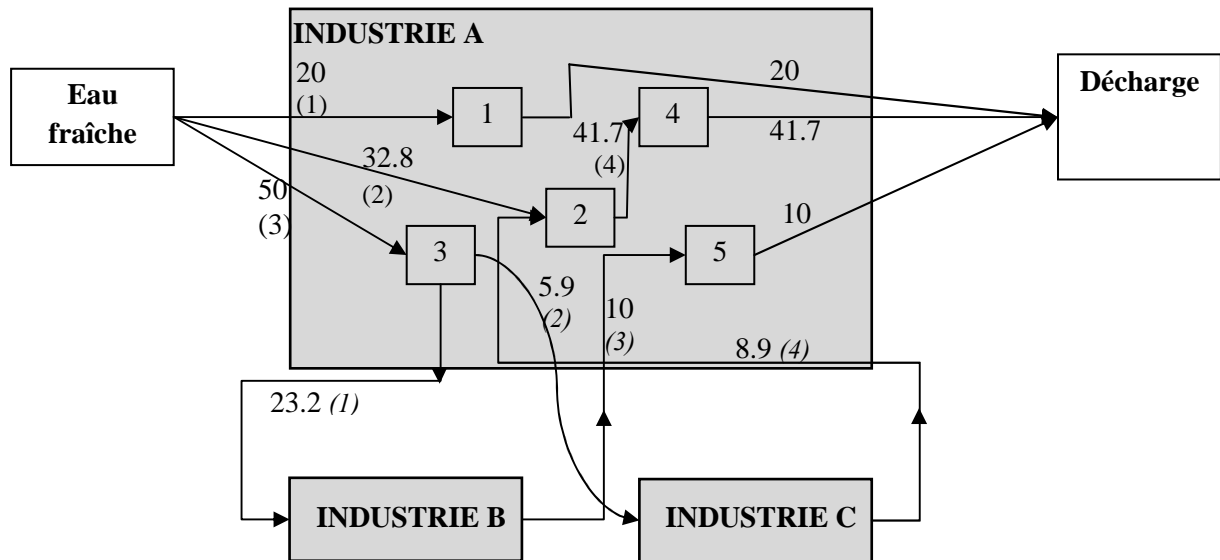
Les solutions obtenues suite à l'optimisation sont comparées avec le cas 1 (entreprise seule) servant de référence pour cette configuration puisqu'il ne contient pas d'unité de régénération. Les gains sont ainsi calculés en pourcentage (positif ou négatif) par rapport au cas 1. Par soucis de lisibilité et de concision, seuls les résultats conduisant à des gains positifs pour chacune des trois entreprises sont présentés dans les tableaux suivants. Un tableau récapitulatif des solutions rejetées est donné en fin de partie (Tableau V-8). Les résultats retenus sont ceux pour lesquels le gain est positif par rapport au cas 1, et ce pour chaque industrie (A, B et C).

<i>Industrie</i>	<i>Cas</i>	<i>F<sub>1</sub> (T/h)</i>	<i>F<sub>w</sub> (T/h)</i>	<i>CEG (T/h)</i>	<i>NCE</i>	<i>Gain (%)</i>
A	<i>Cas 1</i>	98.3	98.3	651	6	-
	Cas 4	103	92.6	623	6	<b>+4.3</b>
B	<i>Cas 1</i>	54.6	54.6	362	8	-
	Cas 4	45	53.6	346	6	<b>+4.3</b>
C	<i>Cas 1</i>	190	190	1259	7	-
	Cas 4	180	182	1204	9	<b>+4.3</b>
<b>EIP</b>	<b>Total cas 1</b>	<b>343</b>	<b>343</b>	<b>2272</b>	<b>21</b>	-
	<b>Total cas 4</b>	<b>328</b>	<b>328</b>	<b>2173</b>	<b>21</b>	<b>+4.3</b>

**Tableau V-5. Résultats positifs obtenus pour l'EIP sans unité de régénération.**

D'après le tableau V-5, seul le cas 4 permet d'assurer un gain positif pour chaque industrie. Les cas 2 et 3 présentent tous deux des gains négatifs pour au moins une industrie et ont de ce fait été reportés dans le tableau V-8 en fin de paragraphe.

Le regroupement des trois industries peut ainsi profiter à chacune d'entre elles à condition qu'elles aient toutes le même bénéfice (condition imposée par le cas 4) par rapport au cas où elles fonctionneraient de manière individuelle. Dans le cas présent, on obtient un gain uniforme de +4.3% tout en conservant un nombre de connexions minimal (21).



**Figure V-6. Réseau optimal de l'industrie A dans le cas 4, lorsqu'elle est incluse dans l'EIP (les débits sont exprimés en T/h et les numéros de connexions sont entre parenthèses et normaux pour les connexions internes et en italiques pour les externes).**

La figure V-6 représente le réseau de l'industrie A incluse dans l'EIP (cas 4). Elle peut être directement comparée à la figure V-5, qui illustre le réseau de la même industrie hors regroupement (cas 1). La principale différence vient du fait que dans le cas 4, l'unité de procédé 3 ne donne plus directement son eau usée au procédé 5, mais l'envoie vers les industries B et C. De même, l'unité 5 reçoit l'eau de l'industrie C. Enfin, le réseau contient 4 connexions internes et 4 externes soit toujours un NCE de 6.

### ***2.6 Parc éco-industriel avec une unité de régénération par entreprise (Cas 6, 7 et 8)***

Désormais, chacun des trois membres de l'EIP décide d'être équipé d'une unité de régénération. Selon l'optimisation effectuée précédemment, chaque entreprise fait son choix parmi les trois types d'unités de régénération : I pour A et B et II pour C. Les trois entreprises constituent un EIP sans unité commune de régénération, mais en permettant à leurs flux d'eau pollués d'être traités soit dans leur propre unité de régénération, soit dans les deux autres entreprises.

Voici le rappel des cas étudiés dans cette partie :

- **Cas 6** : les trois industries possèdent leur propre unité de régénération. Elles se rassemblent au sein d'un EIP et autorisent un nombre illimité de connexions.
- **Cas 7** : les trois industries possèdent leur unité de régénération mais le nombre de connexions de l'EIP est limité au minimum faisable de 26 connexions (Tableau V-4).
- **Cas 8** : les trois industries possèdent leur unité de régénération, le nombre de connexions total est limité à 26 et le regroupement doit profiter économiquement à chaque industrie de manière équivalente.

Comme pour les cas précédents, seuls les résultats positifs (gain positif pour chacune des industries du parc) sont notés dans le tableau 6. Les gains sont calculés par rapport au cas 1 et par rapport au cas 5.

	<i>Cas</i>	$F_1$ (T/h)	$F_w$ (T/h)	$F_2$ (T/h)	$CEG$ (T/h)	<i>NCE</i>	<i>Gain par rapport au cas 1 (%)</i>	<i>Gain par rapport au cas 5 (%)</i>
A	<i>Cas 1</i>	98.3	98.3	-	651	6	-	-
	<i>Cas 5</i>	20	20	166	195	8	+70	-
	<i>Cas 8</i>	20	15	166	168	7	<b>+74</b>	<b>+13.8</b>
B	<i>Cas 1</i>	55	55	-	362	8	-	-
	<i>Cas 5</i>	20	20	67	157	8	+57	-
	<i>Cas 8</i>	20	12	128	135	9	<b>+62</b>	<b>+13.8</b>
C	<i>Cas 1</i>	190	190	-	1259	7	-	-
	<i>Cas 5</i>	20	20	192	469	10	+63	-
	<i>Cas 8</i>	20	33	114	404	10	<b>+68</b>	<b>+13.8</b>
	<i>Total Cas 1</i>	343	343	-	2272	21	-	-
	<i>Total Cas 5</i>	60	60	426	821	26	+64	-
	<b>Total Cas 8</b>	<b>60</b>	<b>60</b>	<b>409</b>	<b>708</b>	<b>26</b>	<b>+69</b>	<b>+13.8</b>

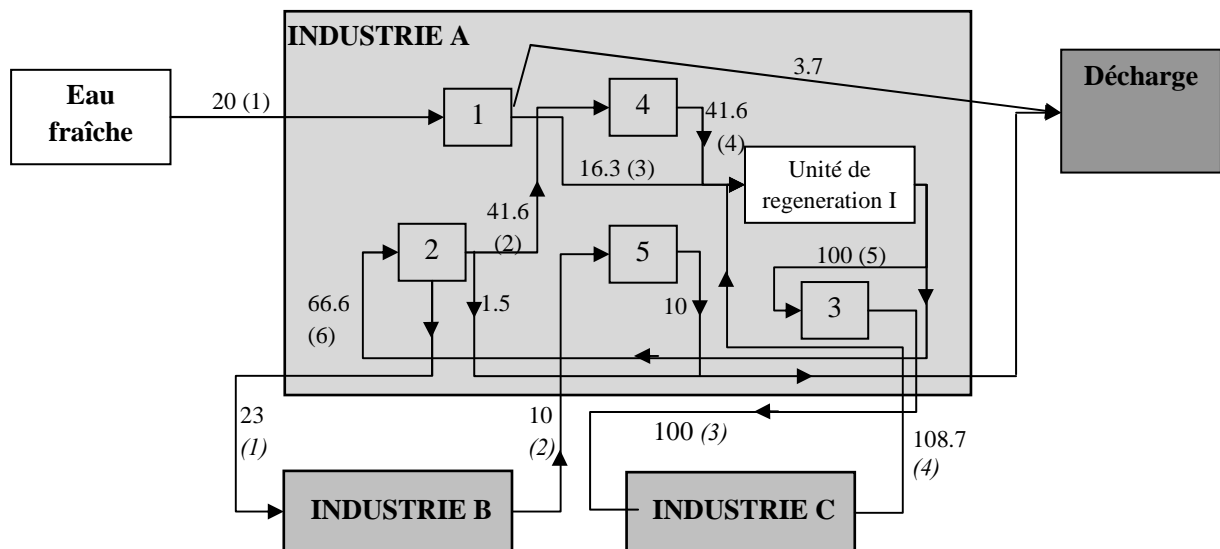
**Tableau V-6. Résultats positifs obtenus pour l'EIP avec unités de régénération individuelles.**

Les cas 6 et 7 n'ont pas permis d'obtenir un gain positif pour chaque industrie et sont donc reportés dans le tableau 8. Seul le cas 8 dans lequel les industries doivent nécessairement gagner le même bénéfice aboutit à un résultat positif pour chacune d'entre elles. Les gains sont significatifs avec un total de 69 % de bénéfice par rapport au cas où l'industrie est seule,

sans unité de régénération (cas 1) et près de 14% dans le cas où elle est seule avec sa propre unité de traitement (cas 5). Ce bénéfice est directement lié à la réduction du débit d'eau déversé à la décharge. En effet, il vaut 426 T/h lorsque les industries sont hors EIP et 409 T/h lorsqu'elles sont dans l'EIP. La redistribution d'une partie des eaux usées vers les industries du parc a pour effet d'améliorer le gain pour chacune des entreprises. Ainsi pour une même consommation d'eau fraîche, d'eau régénérée et un même nombre de connexions (26), les résultats sont meilleurs lorsque les industries se regroupent, même si elles ont chacune leur propre unité de régénération.

Cette étude permet donc de montrer que l'intérêt économique de posséder une unité de régénération est significatif, que l'industrie ait un fonctionnement autonome ou incluse dans un EIP. Avec une unité de régénération, le regroupement est également plus avantageux pour chacune d'entre elles.

Afin de constater l'évolution de l'industrie A, son réseau est illustré sur la figure V-7. Il consomme 20 T/h d'eau, possède 6 connexions internes, 4 connexions externes (NCE=8) et régénère 166 T/h d'eau.



**Figure V-7. Réseau optimal de l'industrie A dans le cas 8, lorsqu'elle est incluse dans l'EIP (les débits sont exprimés en T/h et les nombres de connexions apparaissent entre parenthèses. Les nombres standard indiquent les connexions internes tandis que ceux en italique représentent les connexions externes).**

### ***2.7 Parc éco-industriel avec une unité de régénération commune (Cas 9 à 13)***

En prenant en compte les résultats positifs obtenus en constituant un EIP, on étudie maintenant la possibilité d'avoir une unité de régénération commune à l'ensemble du parc. Une étude d'optimisation préliminaire a montré que la meilleure solution globale pour les trois entreprises est de partager l'unité de régénération I. Dans la littérature, cette configuration est désignée par « intégration indirecte » (Chew et al., 2010b).

Les configurations étudiées sont les suivantes :

- **Le cas 9** consiste à étudier le regroupement des 3 industries lorsqu'elles partagent l'unité de régénération de type I, sans aucune autre contrainte.
- **Le cas 10** est l'option selon laquelle les industries partagent l'unité de type I et pour chacune, le nombre de connexions externes est limité à deux.
- **Le cas 11** est le cas où l'EIP contient un intercepteur dans lequel les trois types d'unités de régénération sont inclus (I, II et III) et chacune des industries a le choix d'utiliser celui qu'elle veut. Le nombre de connexions est illimité.
- **Le cas 12** est identique au cas 11, mais le nombre de connexions est limité au minimum faisable : 26.
- **Le cas 13** est également identique au cas 11, mais le nombre de connexions est arbitrairement limité à 31.

Les résultats conduisant à un gain positif pour chaque industrie sont regroupés dans le tableau V-7, dans lequel, comme pour les cas précédents, le gain est donné en pourcentage par rapport au cas 1 et au cas 5. Seul le cas 13 est concerné, il est le seul à proposer des gains positifs pour chacune des trois industries. En effet, les cas 9, 10, 11 et 12 défavorisent toujours au moins une industrie qui perd tout bénéfice en se positionnant dans ces configurations et ne trouve ainsi aucun avantage à intégrer l'EIP (Tableau V-8). Le cas 13 est celui où chacune des industries doit tirer le même profit de l'EIP que les deux autres, mais le nombre de connexions a été augmenté par rapport au minimum faisable (cas 12), puisque cette configuration n'était pas satisfaisante. Donc, en augmentant légèrement le nombre de connexions, une solution favorable est obtenue, sans toutefois permettre d'obtenir davantage

de bénéfiques que dans le cas 8 précédemment étudié. En effet, en utilisant chacune leur propre unité de régénération, les industries obtenaient 13.8 % de bénéfice (cas 8) alors que dans le cas 13, elles ne gagnent que 3.8 %. Pour chaque industrie, une perte de 11.7% est ainsi constatée pour cette configuration.

	<i>Cas</i>	$F_1$ (T/h)	$F_w$ (T/h)	$F_2$ (T/h)	$CEG$ (T/h)	<i>NCE</i>	<i>Gain par rapport au cas 1 (%)</i>	<i>Gain par rapport au cas 5 (%)</i>
A	<i>Cas 1</i>	98.3	98.3	-	651	6	-	-
	<i>Cas 5</i>	20	20	166	195	8	+70	-
	<b>Cas 13</b>	20	19	166	188	9	<b>+71</b>	<b>+3.6</b>
B	<i>Cas 1</i>	55	55	-	362	8	-	-
	<i>Cas 5</i>	20	20	67	157	8	+57	-
	<b>Cas 13</b>	20	19	67	151	12	<b>+77</b>	<b>+3.6</b>
C	<i>Cas 1</i>	190	190	-	1259	7	-	-
	<i>Cas 5</i>	20	20	192	469	10	+63	-
	<b>Cas 13</b>	20	22	213	452	10	<b>+31</b>	<b>+3.6</b>
	<i>Total Cas 1</i>	343	343	-	2272	21	-	-
	<i>Total Cas 5</i>	60	60	426	821	26	+64	-
	<b>Total Cas 13</b>	<b>60</b>	<b>60</b>	<b>446</b>	<b>791</b>	<b>31</b>	<b>+65</b>	<b>+3.6</b>

**Tableau V-7. Résultats positifs obtenus pour l'EIP avec unité de régénération commune.**

Le fait de posséder un intercepteur commun au sein de l'EIP n'est donc pas une solution économiquement rentable, ni même d'un point de vue environnemental puisque cette configuration ne permet pas de limiter les consommations d'eau. Dans une étude complémentaire non reportée ici, le nombre de connexions a encore été augmenté, ce qui a conduit à des accroissements mineurs du gain, non compensés par le coût supplémentaire induit par les connexions.

## 2.8 Discussion

A titre indicatif, le tableau V-8 répertorie les différents cas ayant été rejetés puisqu'ils conduisent à des gains négatifs pour au moins une des trois industries. Cette étude sur les réseaux d'eau des EIP a permis de montrer plusieurs points intéressants. Le premier est le fait qu'un investissement dans une unité de régénération permet d'augmenter les gains de façon significative, que l'EIP existe ou non.



<i>Solutions rejetées</i>	<i>Gain par rapport au cas 1 (%)</i>	<i>Gain par rapport au cas 5 (%)</i>
C Cas 2	-8.2	-
B Cas 3	-10.5	-
C Cas 3	-2.6	-
A Cas 6	-	-10.2
B Cas 6	-	-61.8
A Cas 7	-	-74.9
A Cas 9	-	-144.6
B Cas 10	-	-233.1
B Cas 11	-	-138.2
A Cas 12	-	-7.7
B Cas 12	-	-7.7
C Cas 12	-	-7.7

**Tableau V-8. Solutions donnant un gain négatif pour au moins une des trois industries.**

Des travaux antérieurs (Chew et al., 2010b ; Aviso et al., 2010b) ont mis en œuvre des stratégies pour optimiser des EIP via une intégration indirecte (unité de régénération commune) car *c'est a priori* la solution écologiquement (terme pris dans un sens plus politique que scientifique) la plus attractive. Cependant, cette étude montre qu'une intégration directe (unités de régénération individuelles) est beaucoup plus avantageuse d'un point de vue économique. Outre l'aspect économique, la mise en commun de moyens peut poser des problèmes de management, si les entreprises ne sont pas assez culturellement préparées à ce genre de situation. En effet lorsqu'un moyen de production est partagé entre de nombreux intervenants, chacun des participants risque de ne pas s'impliquer suffisamment dans sa gestion par suite d'une dilution des responsabilités. De façon plus générale, on peut retrouver là ce que l'histoire récente du siècle précédant a clairement montré : la collectivisation à outrance des moyens de production conduit très souvent à un désastre économique. Pour revenir au sujet de ce mémoire, il est bien connu que de nombreux éco-parcs qui sont souvent des vitrines écologiques des nations, ne survivent généralement que grâce à de massives subventions publiques. L'intérêt majeur de cette étude est que sans aller s'intéresser directement à la solution la plus écologiquement élégante, diverses situations partant de l'absence totale de considération écologique, jusqu'à cette solution écologiquement idéale ont été étudiées, afin de dégager le meilleur compromis entre écologie et économie.

La méthode mise en œuvre dans ce chapitre permet de calculer les solutions en des temps de calcul très faibles, même si les cas étudiés contiennent un grand nombre de variables (Tableau V-9). Ceci s'explique par une formulation linéaire présentant un très net avantage

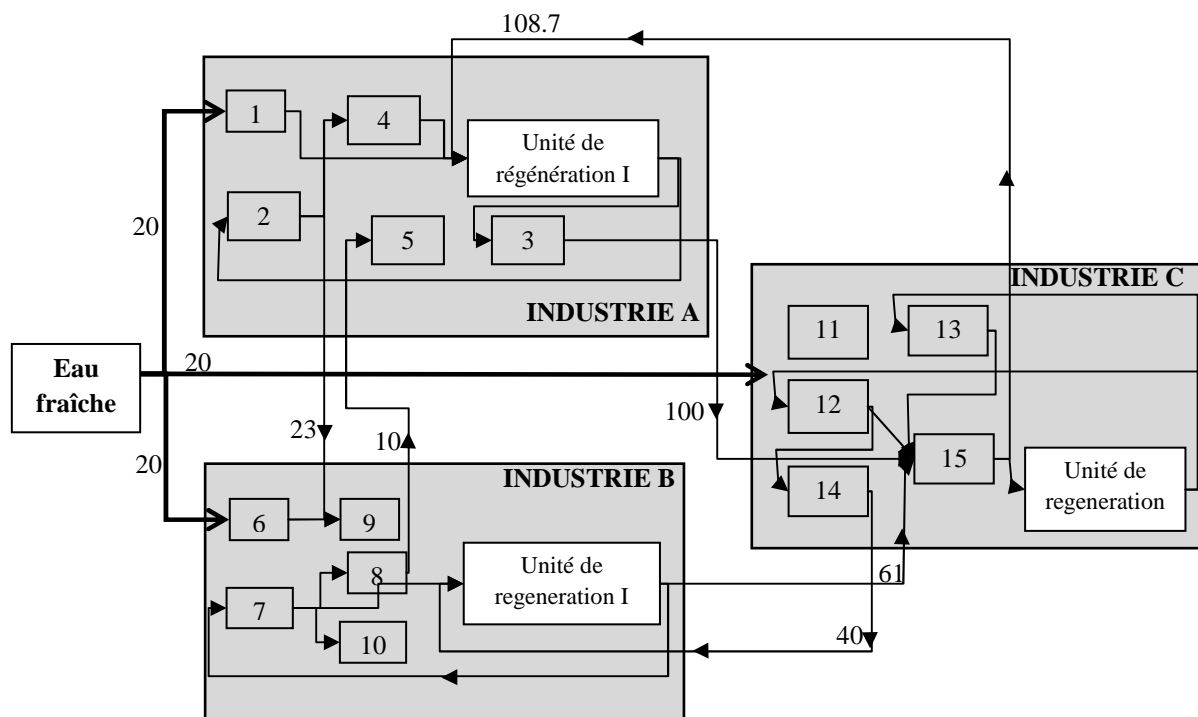
pour la résolution de ce type de problème. Les calculs ont été réalisés à l'aide d'un ordinateur équipé d'un processeur Intel Core 2 Duo cadencé à 2.53 GHz, et 3.45Go de mémoire vive.

<i>Problème</i>	<i>Variables continues</i>	<i>Variables entières</i>	<i>Contraintes</i>	<i>Temps de calcul (s)</i>
Cas 1	173	47	214	0.063
Cas 2-4	836	255	900	0.109
Cas 5-8	1164	357	1312	0.140
Cas 9-13	1164	357	1319	0.250

**Tableau V-9. Dimensions des cas étudiés et temps de calcul associés.**

Enfin, cette étude a permis de concevoir un réseau optimal (figure V-8) pour l'EIP possédant plusieurs avantages :

- Chaque industrie profite d'un bénéfice de 13.8% sur la consommation d'eau.
- Les débits d'eau sont raisonnables, puisqu'ils sont tous supérieurs à 2 T/h, qui représente la valeur minimale autorisée.
- Le nombre de connexions internes et externes est minimisé, ce qui conduit à une topologie facile à mettre en œuvre dans la pratique.
- Les consommations d'eau fraîche et d'eau régénérée sont réduites, ce qui implique un impact environnemental limité, ainsi qu'un faible rejet d'eaux usées.



**Figure V-8. Réseau optimal de l'EIP (cas 8, les débits sont exprimés en T/h).**

### **3. Réseau d'eau et de chaleur au sein d'un parc éco-industriel**

#### ***3.1 Formulation du problème***

Après avoir démontré que la formation d'un EIP pouvait permettre des gains non négligeables en ne s'intéressant qu'à l'eau, il est important d'élargir la collaboration au sein d'un EIP avec des flux thermiques associés à l'eau. Le problème consiste à allouer les courants dans le réseau constitué des trois industries présentées plus haut. En plus de ces caractéristiques en termes de polluants, chaque unité de procédé possède désormais sa propre température de fonctionnement. Ainsi, un échangeur de chaleur peut être positionné devant chaque unité de procédé de manière à ce que la température désirée soit atteinte. La présence des échangeurs est introduite dans le programme sous forme de variables binaires, de façon analogue à ce qui a été réalisé dans la partie 1 du chapitre IV., Le réseau d'eau et d'énergie est ainsi optimisé sans intégration énergétique, en considérant les objectifs suivants:

- le CEG de chaque industrie, sans sa composante concernant le débit d'eau régénérée puisque nous ne considérons pas d'unité de régénération dans cet exemple
- la consommation énergétique de chaque industrie
- le nombre de connexions dans le parc
- le nombre d'échangeurs de chaleur nécessaire au fonctionnement du parc.

Afin d'éviter des débits dérisoires, la contrainte permettant d'éliminer les débits inférieurs à 2T/h est ajoutée au programme. De plus, le nombre d'échanges entre chaque industrie du parc est également limité à deux par couple d'industrie, comme cela a été réalisé dans la première partie de ce chapitre. Pour cet exemple composé de trois industries, soit 15 unités de procédé, le problème MILP associé comporte 1261 variables continues, 388 variables entières et 1704 contraintes. Le temps CPU associé à la résolution de cet exemple est de 0.328 s.

#### ***3.2 Présentation de l'étudié***

L'exemple préalablement décrit (Tableau V-2) a été complété en assignant des températures à chaque procédé. Les températures sont choisies de manière arbitraire en restant dans les ordres de grandeur de ceux de la littérature (Chen et Hung, 2004 ; Chen et al., 2010). Ainsi, à chaque procédé est associée une contrainte sur la température du flux sortant et il lui

sera adjoint un échangeur qui pourra être, soit un refroidisseur soit un réchauffeur. Les paramètres de ce nouvel EIP sont notés dans le tableau V-10.

<i>Entreprise</i>	<i>Procédé</i>	<i>Charge en polluant (g/h)</i>	<i>Concentration maximale d'entrée (ppm)</i>	<i>Concentration maximale de sortie (ppm)</i>	<i>Température de sortie (°C)</i>
A	1	2000	0	100	40
	2	2000	50	80	100
	3	5000	50	100	80
	4	30000	80	800	60
	5	4000	400	800	50
B	6	2000	0	100	90
	7	2000	50	80	70
	8	5000	80	400	50
	9	30000	100	800	40
	10	4000	400	1000	100
C	11	2000	0	100	80
	12	2000	25	50	60
	13	5000	25	125	50
	14	30000	50	800	90
	15	15000	100	150	70

**Tableau V-10. Paramètres de l'EIP traité.**

### 3.3 Résultats des optimisations

#### 3.3.1 Entreprises sans lien avec les autres

L'ajout de températures a pour effet d'augmenter le nombre de critères à considérer. Comme dans l'exemple précédent, la quantité d'eau fraîche et le nombre de connexions sont prises en compte. A ceux-ci s'ajoutent le nombre d'échangeurs de chaleur ainsi que l'énergie échangée. L'ensemble de ces critères représente l'impact économique mais aussi l'impact environnemental. Des optimisations multiobjectifs sont réalisées dans un premier temps de façon à déterminer les bornes du problème. Les valeurs optimales pour chaque entreprise prise séparément sont consignées dans le tableau V-11. Il s'agit ici des repères initiaux pour l'élaboration de l'EIP. Pour obtenir ces configurations, une stratégie identique à ce qui a été réalisé précédemment est adoptée. Ainsi, pour chaque nombre d'échangeurs, le nombre de connexions minimal est calculé dans un premier temps. C'est à partir de là, lorsque les nombres d'échangeurs et de connexions sont fixés, que des optimisations bi-critères [CEG; Energie échangée] sont réalisées.

<i>Entreprise</i>	<i>Nombre de connexions</i>	<i>Nombre d'échangeurs</i>	<i>Débit d'eau fraîche (T/h)</i>	<i>CEG (T/h)</i>	<i>Energie échangée (MW)</i>
A	7	3	111.8	740.7	740.9
B	8	3	63.1	418	418.2
C	7	5	195	1291.9	129.9
A+B+C	22	11	369.9	2450.6	2451

Tableau V-11. Configuration optimale de chaque industrie individuelle.

Les résultats montrent que l'ajout des températures engendre une augmentation des consommations d'eau puisque le total du CEG du cas 1 était de 2272 T/h et passe ici à 2450 T/h. En effet, le fait d'imposer des températures implique une consommation d'eau plus importante pour satisfaire aux besoins de chaque unité de procédé. Enfin, le nombre minimum d'échangeurs est 11 au total lorsque l'on considère la somme des besoins individuels de chaque entreprise. Cependant, le minimum pour l'EIP total est de 10 échangeurs, le rassemblement des trois industries permettant d'économiser un échangeur. Ceci est engendré par le fait que l'unité de procédé 10 (appartenant à l'industrie B) était alimentée par de l'eau devant être chauffée (dans le cas où elle est individuelle) mais grâce au regroupement, c'est l'unité 2 (de l'industrie A) qui l'alimente puisque ce courant sort également à 100°C. Le réseau total de l'EIP comporte ainsi un échangeur de moins.

Suite à cette étude préliminaire, deux configurations incluant chacune plusieurs cas décrits ci-après sont étudiés :

- Configuration selon laquelle l'éco-parc est constitué de 11 échangeurs.
- Configuration selon laquelle l'éco-parc est constitué de 10 échangeurs.

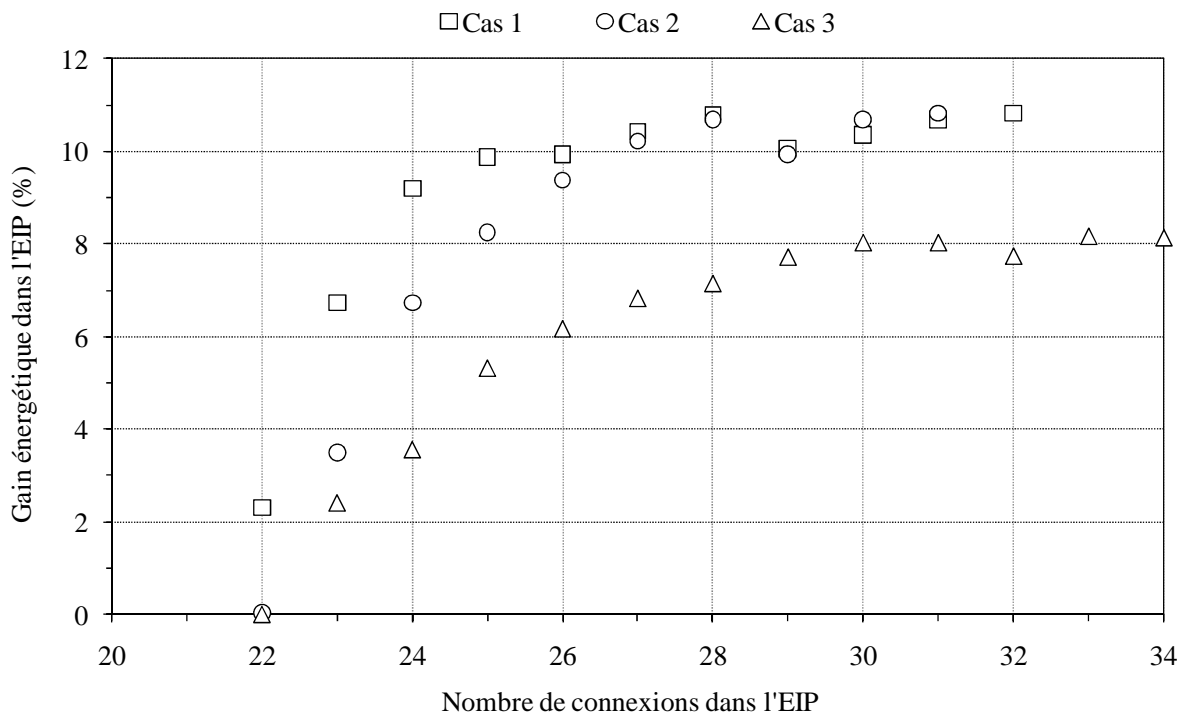
### 3.3.2 Eco-parc avec 11 échangeurs

Plusieurs cas sont étudiés et pour chacun d'entre eux, des fronts de Pareto sont tracés selon le gain énergétique (en pourcentage par rapport au cas où les industries n'ont pas de lien avec les autres), en fonction du nombre de connexions. Le premier critère (gain) doit être maximisé tandis que le second (nombre de connexions) doit être le plus faible possible.

Les cas étudiés sont les suivants :

- **Le cas 1** représente l'option selon laquelle le débit d'eau consommé par l'EIP est inférieur à la somme des débits de chaque industrie (369.9 T/h).
- **Le cas 2** implique que toutes les industries ont un gain positif sur le CEG.
- **Le cas 3** impose un gain identique pour chaque entreprise sur le CEG.

Les résultats sont illustrés sous forme de fronts de Pareto sur la figure V-9.



**Figure V-9. Fronts de Pareto pour chaque cas étudié lorsque l'EIP comporte 11 échangeurs.**

Le cas 1 est celui permettant d'obtenir les meilleurs gains globaux pour l'EIP. Cependant, il ne garantit pas que les trois industries tirent le même profit du regroupement. Seul le cas 3 impose cette condition, mais lorsque le nombre de connexions est réduit au minimum (22), aucun gain n'est obtenu. Il est donc alors nécessaire d'augmenter le nombre de connexions pour obtenir des gains significatifs, sans toutefois pouvoir dépasser 8% de gain énergétique pour chaque entreprise. Enfin, les cas 2 et 3 donnent lieu à des comportements similaires. Avec 11 échangeurs et un nombre minimum de connexions, l'EIP ne permet pas de faire des bénéfices. Le gain global le plus important qu'il est possible d'obtenir en termes énergétique est 11% pour l'EIP (cas 2). Cette solution nécessite 28 connexions et chaque

industrie peut avoir le même gain que les autres sur le CEG, donc sur sa consommation d'eau. En ce qui concerne l'énergie les gains respectifs pour les entreprises A, B et C sont respectivement de 5%,3% et 3%.

### 3.3.3 *Eco-parcs avec 10 échangeurs*

Le nombre d'échangeurs de chaleur dans l'EIP est ici fixé à sa valeur minimale : 10. De plus, il est imposé que le gain énergétique, par rapport au cas où l'industrie fonctionne sans lien avec les autres, soit le même pour chaque entreprise de l'EIP. Les trois cas étudiés dans cette nouvelle configuration sont les suivants :

- Le **cas 4** est celui où le débit d'eau consommé par l'EIP est inférieur à la somme des débits d'eau de chaque entreprise.
- Le **cas 5** revient à ce que toutes les industries aient un gain positif sur le CEG.
- Le **cas 6** correspond au cas où chaque industrie a le même gain que les autres sur le CEG.

Les résultats sont représentés sur la figure ci-dessous (figure V-10) :

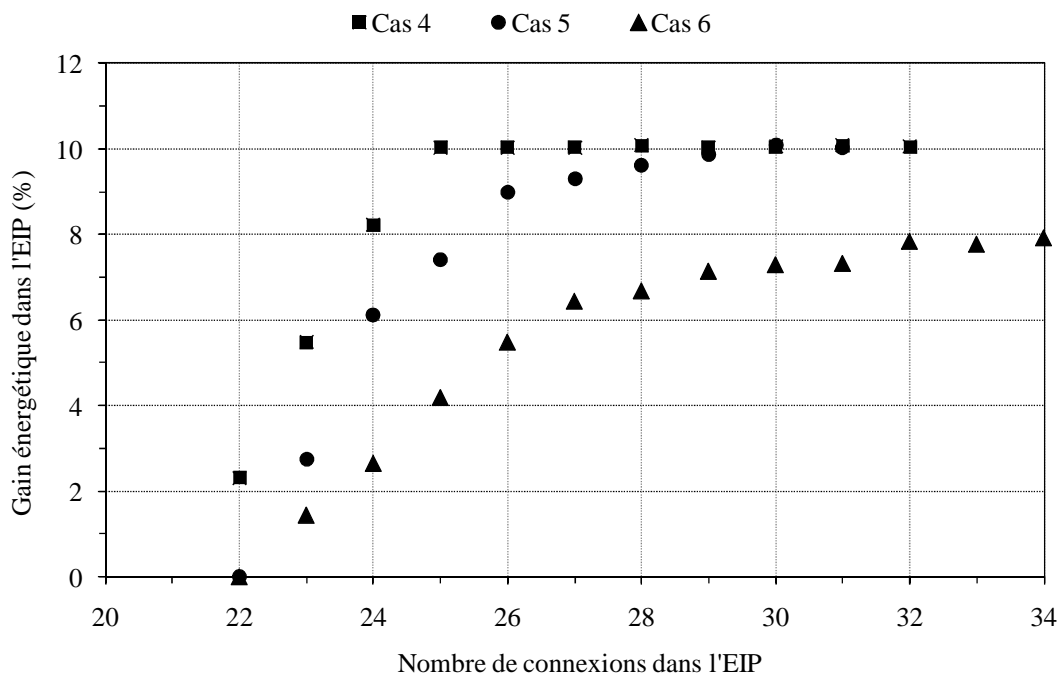


Figure V-10. Evolution du gain en fonction du nombre de connexions pour 10 échangeurs

Les courbes ont globalement la même allure que sur la figure 9, lorsque 11 échangeurs étaient impliqués. On peut cependant constater que le fait de supprimer un échangeur conduit à une baisse du gain maximal en termes d'énergie de 1%. Dans le cas présent, le maximum est ainsi d'environ 10% de gain.

#### 3.3.4 *Discussion*

Choisir la configuration optimale de l'EIP final à partir des figures V-9 et V-10 est un problème délicat. Les entreprises doivent en effet choisir entre deux options : soit privilégier un bénéfice sur leur consommation énergétique et donc sur leur coût, soit travailler dans un secteur très concurrentiel les menant à opter pour un cas tel que le numéro 3. Dans ce travail, le but n'est pas de trouver quelles décisions les entreprises prendront, mais de montrer que la collaboration permet d'avoir des gains non négligeables.

Dans le cas des EIP, l'aide à la décision est souvent difficile à proposer, puisqu'elle dépend justement de nombreux autres facteurs qu'ils soient sociétaux ou humains. Dans l'exemple traité ici un changement de point de vue pourrait permettre de choisir parmi l'ensemble des solutions proposées. En effet, si au lieu de considérer l'ensemble des unités de procédé dans des entreprises différentes, on admet qu'elles sont détenues par la même compagnie mère, les gains ne sont alors plus vus de la même manière, en particulier on peut relaxer la contrainte de gain positif pour chaque entreprise et la remplacer par un gain global positif pour la compagnie. L'exemple étudié revient à explorer les solutions pour une industrie de 15 unités de procédés et la solution finale doit maximiser ses gains en termes de consommation énergétique et de consommation d'eau pour des nombres d'échangeurs et de connexions limités. Ces optimisations multicritères ont été menées et les fronts de Pareto qui en résultent sont représentés sur la figure V-11.

Les gains obtenus deviennent plus importants puisqu'ils sont d'environ 12% (sur l'eau et l'énergie) lorsque le nombre d'échangeurs est au minimum (8) et grimpent jusqu'à environ 13 ou 14% si trois échangeurs sont ajoutés au réseau. Plus le nombre d'échangeurs du réseau est augmenté, moins le système est contraint et plus les gains peuvent être importants. Les gains maximaux obtenus sont de 14% concernant l'énergie et de 15% pour le CEG.



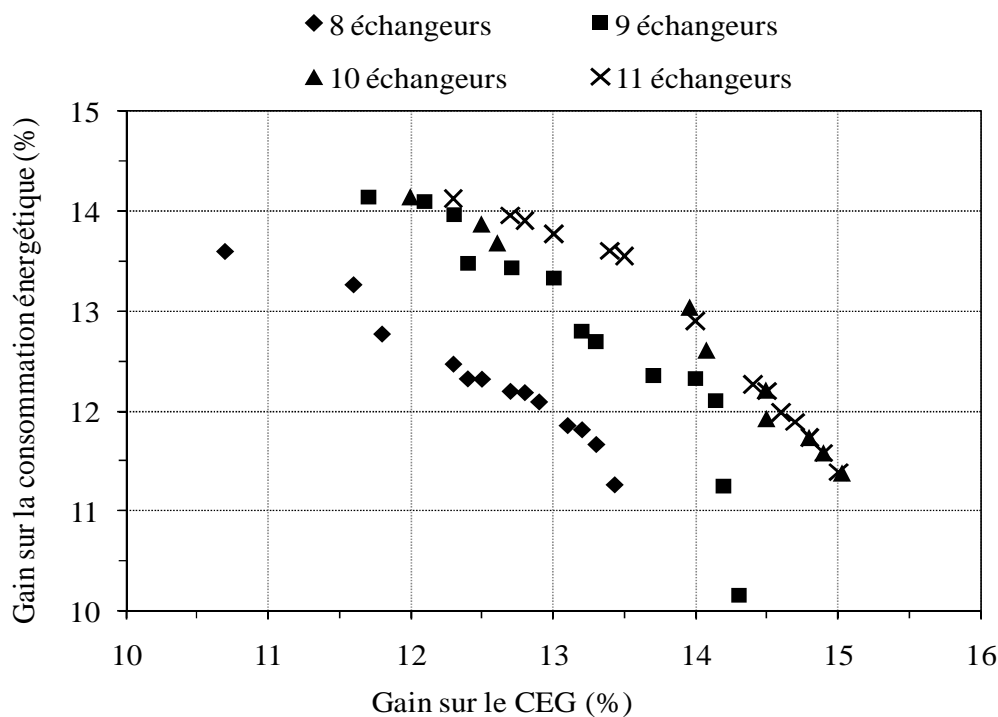


Figure V-11. Fronts de Pareto lors de l'EIP est assimilé à une seule entreprise.

Cette approche permet de proposer une alternative à l'aide à la décision dans le cas des EIP dans laquelle les facteurs sociétaux ne sont pas pris en compte. Il faut toutefois avoir présent à l'esprit qu'un accroissement du nombre d'échangeurs de chaleur induit une augmentation des coûts d'investissement, d'où la nécessité pour l'exploitant de déterminer un compromis.

#### 4. Conclusion

L'étude réalisée dans ce chapitre consiste dans un premier temps à proposer une conception optimale des réseaux d'eau de parcs éco-industriels, puis dans un second temps, de leurs réseaux d'eau et d'énergie. Grâce à l'approche mise en œuvre dans les chapitres précédents pour les réseaux d'eau d'une entreprise sans aucun lien avec d'autres, des cas complexes peuvent être résolus. En effet, la stratégie de résolution est basée sur une programmation mathématique formulée de façon linéaire qui implique des temps de calculs minimes même pour des problèmes comportant des milliers de variables et contraintes.

L'étude d'un exemple de parc extrait d'Olesen et Polley (1996) selon différents cas de figure permet de formuler plusieurs conclusions importantes :

- 1) L'ajout d'une unité de régénération au sein d'un réseau d'eau (qu'il soit dans un EIP ou non) permet d'obtenir des gains pouvant aller jusqu'à 70% en termes de consommation d'eau (traduite par l'indicateur CEG).
- 2) Lorsqu'aucune unité de régénération n'est impliquée, le regroupement d'industries au sein d'un EIP est économiquement rentable puisque des gains de l'ordre de 5% peuvent être réalisés pour chaque entreprise désirant intégrer le parc.
- 3) Dans l'exemple traité, si les entreprises d'un EIP désirent investir dans une unité de régénération, celle-ci doit être introduite au sein de chacune d'elles. En effet, il est préférable que chaque industrie choisisse son unité de régénération plutôt que d'investir dans une unité commune. En effet compte tenu des spécifications (tableau 2), les entreprises A et B choisissent une unité de régénération de type I, alors que l'entreprise C doit fonctionner avec une unité de type II, ce qui conduit à CEG nettement plus important (tableau 1).

Le schéma d'intégration indirect (unité de régénération commune), approche très souvent utilisée dans les études antérieures (Chew et al., 2010b, Aviso et al., 2010b) n'apporte pas forcément des résultats très intéressants. Dans cette étude elle permet de proposer des bénéfices d'environ 4% pour chaque industrie, contre près de 14% pour le schéma d'intégration direct. Pour l'exemple présenté, la mise en commun de l'unité de régénération doit faire intervenir une unité de type II, ce qui entraîne un sur coût inutile pour les entreprises A et B.

En imposant une contrainte d'égalité de gain pour chaque participant à l'EIP, des bénéfices significatifs pour chaque industrie sont obtenus. Contrairement à la majorité des études précédentes où l'optimisation est effectuée dans un cadre monocritère, l'approche multiobjectif mise en œuvre permet à partir de plusieurs solutions potentielles de concevoir un EIP dont la topologie et les consommations d'eau sont limitées, c'est-à-dire compétitif au plan économique. L'un des points clés de cette étude est que sans aller s'intéresser directement à la solution la plus écologiquement élégante (mise en commun de l'unité de régénération), diverses situations partant de l'absence totale de considération écologique, jusqu'à cette solution écologiquement (le terme écologie est pris dans son sens plus politique que scientifique) idéale ont été étudiées, afin de dégager le meilleur compromis entre écologie

et économie. En fait la mise en commun de l'unité de régénération est économiquement viable lorsque tous les participants ont des spécifications de régénération similaires. Dans le cas contraire, la mise en commun nécessite d'utiliser une unité adaptée aux spécifications les plus strictes, ce qui peut entraîner un sur coût pour les entreprises dont les spécifications sont plus larges.

L'approche mise en œuvre pour la conception des réseaux d'eau d'un éco-parc a ensuite été étendue à celle considérant simultanément les problèmes énergétiques. La mise en place d'un EIP a permis de montrer que les entreprises participantes pouvaient dégager un gain économique significatif tout en limitant l'impact environnemental puisque une diminution de la consommation énergétique et d'eau fraîche est observée.

Comme dans le cas des réseaux d'eau pour les EIP, le problème est traité sous un angle multiobjectif, ce qui permet de proposer plusieurs solutions de compromis, alors que dans la majorité des études antérieures l'intégration énergétique est effectuée sur la solution correspondant à la consommation minimale d'eau fraîche. Toutefois la détermination de la « meilleure » solution demeure un problème complexe qui dépasse largement le cadre de la présente étude.

Bien sûr, économie et écologie sont très souvent antinomiques, la première fut très longtemps privilégiée au détriment de la seconde, conduisant en particulier au dérèglement climatique, dont nous avons récemment pris conscience. Ainsi, comme le met en exergue l'étude récente de Reniers et al. (2010), la détermination d'une « bonne » solution de compromis pour les EIP, doit également s'appuyer sur les sciences molles telles que les sciences humaines ou sociétales, afin qu'une nouvelle culture industrielle pas uniquement fondée sur la notion de profit, puisse se développer efficacement pour ne pas profiter qu'à un groupe d'actionnaires, mais également à la région d'implantation et aux populations avoisinantes.



---

---

*Chapitre VI – Conclusions et  
perspectives*

---

---



## Conclusions

Ce travail de thèse a pour but d'optimiser des réseaux d'eau industriels selon plusieurs objectifs. Dans le contexte environnemental actuel, il est primordial de proposer des actions en amont de la production de manière à concevoir des infrastructures limitant au maximum leur impact sur l'environnement. La concurrence étant également de plus en plus pressante dans le secteur industriel, limiter les coûts d'investissement et de production devient essentiel de manière à ce que les solutions proposées soient réalisables. Ces coûts sont estimés à l'aide de différents paramètres comportant par exemple le nombre de connexions dans le réseau, la quantité d'eau devant être régénérée, le débit d'eau fraîche alimentant le réseau ou encore le nombre d'échangeurs de chaleur et l'énergie utilisée pour le fonctionnement des différentes unités composant le système. Les réseaux industriels étudiés peuvent appartenir à deux principales catégories : monopolluants ou multipolluants. Les premiers représentent par exemple les industries papetières pour lesquelles les matières en suspension (fibres de bois de différentes tailles et particules organiques) sont considérées comme un seul polluant. La seconde catégorie de réseaux est caractérisée par la présence de plusieurs polluants. Ceci est le cas pour les industries pétrochimiques et les raffineries au sein desquelles des hydrocarbures, des sels ainsi que des solides en suspension circulent.

Il s'agit là d'un problème d'allocation des réseaux qui consiste à définir les liens qui existent entre les différentes unités (de procédé et de régénération) en termes de débits d'eau et de débits en polluants, ainsi que de déterminer leur existence de façon à minimiser les critères retenus. Bien que pour des raisons de généralité de la démarche, le rôle précis au plan physico-chimique de chacune des composantes du réseau soit volontairement ignoré, il est cependant impératif que certaines de leur propriété soient parfaitement définies au préalable. Ainsi, on se doit de connaître les concentrations maximales en polluants autorisées en sortie et en entrée de chacune des unités ainsi que toutes les caractéristiques leur garantissant un bon fonctionnement.

La diversité des méthodes mises en œuvre dans la littérature a conduit dans un premier temps, à une analyse bibliographique critique en vue d'opter pour une stratégie de résolution sûre et efficace.

Le **chapitre I** débute par la présentation du contexte dans lequel ce type d'étude s'est mise en place. Ensuite, une revue des techniques d'intégration des procédés pour l'optimisation des réseaux d'eau est proposée. Cette partie a permis de constater que les deux grandes méthodes utilisées pour ce type de problème sont : les approches graphiques fondées sur la technique du pincement, ainsi que les techniques de programmation mathématique. Le principal inconvénient de la première classe de méthode est d'être limitée aux systèmes monopolluants, en outre, elle ne permet pas d'optimiser un réseau selon plusieurs objectifs simultanément. Les techniques de programmation mathématique regroupent les méthodes déterministes (LP/MILP et NLP/MINLP) et les méthodes stochastiques (principalement les algorithmes génétiques). La formulation du problème est basée sur des équations de bilans de conservation des concentrations en polluants (ppm) et des débits d'eau (T/h) impliquant des ordres de grandeur très disparates. Ceci nécessite que ces équations soient numériquement résolues avec des tolérances strictes, inférieures à  $10^{-5}$ , ce qui est très délicat avec les méthodes stochastiques, qui gèrent difficilement les contraintes égalité d'un problème d'optimisation. Ce chapitre a ainsi conduit à opter pour une méthode de programmation mathématique à l'aide d'une méthode de résolution déterministe. Pour mener à bien ces optimisations le logiciel GAMS est choisi puisqu'il présente une grande variété de solveurs. Enfin, l'absence d'études concernant des optimisations multiobjectif de réseaux d'eau malgré leur importance dans le contexte actuel, nous a instantanément orienté vers la prise en compte de plusieurs objectifs.

Le **chapitre II** présente dans un premier temps une formulation MINLP applicable à tous les types de réseaux, qu'ils soient monopolluants ou multipolluants. Dans un second temps, une formulation originale s'appuyant sur une expression des variables en débits partiels (au lieu de débits totaux) est proposée. A l'aide d'une simplification basée sur les conditions d'optimalité énoncées par Savelski et Bagajewicz (2001), la formulation devient linéaire pour les cas particuliers des réseaux d'eau monopolluants. Le programme MILP est résolu à l'aide du solveur CPLEX 9.1 de la bibliothèque GAMS. Deux exemples de réseaux sont étudiés et optimisés selon plusieurs objectifs : le débit d'eau fraîche, le débit d'eau régénérée et le nombre de connexions menant à la représentation des solutions sous forme de fronts de Pareto. Cette optimisation multiobjectif est réalisée à l'aide d'une procédure lexicographique adaptée d'une méthode epsilon-contrainte. Un nouvel indicateur est mis en place : le CEG (cout équivalent global) afin de proposer une aide à la décision soit parmi les



solutions de Pareto, soit en phase post-optimisation. Il prend en compte les différents débits d'eau impliqués dans le réseau affectés de coefficients relatifs au coût de l'eau fraîche, il est exprimé en T/h. Cet indicateur a permis de choisir un réseau optimal en termes de consommations d'eau et de topologie permettant d'économiser jusqu'à 7% d'eau par rapport aux études antérieures.

Suite aux résultats positifs obtenus au cours du chapitre II, la stratégie multiobjectif est ensuite étendue aux réseaux d'eau multipolluants dans le **chapitre III**. Seule la formulation de base change puisque les simplifications précédemment effectuées dans le cas monopolluant ne sont plus valables. En effet, dans le cas où plusieurs polluants sont impliqués, il est impossible de fixer les concentrations de sortie à leur valeur maximale sans fausser l'équation de bilan de sortie des unités de procédé. La formulation est donc de type MINLP pour le cas des réseaux multipolluants. Plusieurs exemples de la littérature sont étudiés et optimisés selon les trois objectifs précédemment évoqués. L'étude d'un réseau complexe incluant cinq unités de procédés, une unité de régénération et trois polluants provenant d'une raffinerie, a permis de déterminer un réseau optimal ne pénalisant aucun des trois critères, toujours à l'aide du CEG. Par rapport aux précédentes études, le choix de ce réseau a conduit à un nombre de connexions plus restreint (11 au lieu de 14) et à un débit d'eau régénérée plus faible (223 T/h au lieu de 245 T/h).

Afin de balayer un spectre plus large d'applications industrielles, ce sont les réseaux d'eau et d'énergie qui sont étudiés dans le **chapitre IV**. Aux différents flux d'eau circulant dans le réseau, s'ajoute une température de consigne. Une formulation originale est proposée puisqu'elle consiste à transposer le problème d'allocation des réseaux d'eau, aux réseaux d'eau et d'énergie. La force de cette stratégie est de pouvoir traiter ce type de réseau à l'aide d'une formulation linéaire permettant d'aborder des problèmes très complexes. Ainsi, un échangeur de chaleur est attribué à chaque unité du procédé et de régénération de manière à ce qu'il refroidisse ou réchauffe l'eau entrant pour que sa température corresponde à ce qui est exigé par le procédé. Pour cela, chaque échangeur nécessite une certaine énergie impliquant la formulation de nouveaux critères. Aux précédents objectifs (consommations d'eau et topologie), s'ajoutent le nombre d'échangeurs de chaleur ainsi que l'énergie totale consommée par le réseau. A titre d'exemple, le réseau d'eau et d'énergie optimisé contient 12 unités de procédé et cinq unités de régénération. Le réseau est optimisé en deux étapes : tout

d’abord en allouant les différents courants tout en minimisant les quatre critères retenus, puis dans un second temps, une intégration énergétique permet l’amélioration des résultats obtenus. Cette seconde étape est résolue à l’aide d’une formulation MINLP. Par rapport aux techniques graphiques utilisées par les études antérieures, notre approche permet de proposer un réseau final impliquant un gain de plus de 20% en termes de consommation énergétique, pour une consommation d’eau fraîche similaire.

Dans le **chapitre V**, nous proposons d’étudier les réseaux d’eau dans le contexte d’une symbiose industrielle. La possibilité de changer l’architecture des industries actuelles dans un but de préservation de l’environnement, fait partie des grands challenges de ces dernières années et de celles à venir. Cette étude explore plusieurs configurations pour le regroupement de trois sociétés particulières. De nombreuses options sont étudiées, telles que l’investissement dans une unité de régénération commune (schéma d’intégration indirecte) ou dans plusieurs unités individuelles (schéma d’intégration directe), la limitation du nombre de connexions au sein du parc éco-industriel, ou encore la distribution équitable des gains obtenus par chaque entreprise. Une étude préliminaire permet de déterminer les solutions de Pareto selon les différents critères minimisés (débit d’eau fraîche, débit d’eau régénérée et nombre de connexions). Parmi ces solutions, deux outils d’aide à la décision sont mis en oeuvre afin de déterminer si la solution est plus avantageuse que dans le cas où l’industrie fonctionnerait de façon isolée. Ces deux indicateurs sont le CEG ainsi que le NCE (nombre de connexions équivalent) ; le premier visant à évaluer les différentes consommations d’eau et le second, la topologie du réseau final. La meilleure configuration est celle où chaque industrie possède sa propre unité de régénération, mais peuvent également envoyer ou recevoir les eaux usées de deux autres industries. Celle-ci permet à chaque entreprise d’obtenir un gain significatif d’environ 14%.

Suite à ces résultats positifs, les derniers travaux ont été orientés vers la prise en compte des réseaux d’eau et d’énergie au sein de ce type de regroupement. Pour étudier la réalisation d’une telle symbiose, des données sur les températures sont ajoutées à chaque unité de procédé de l’exemple précédent. Appliquée à ce type de réseau, la méthode mise en oeuvre permet une économie sur la consommation énergétique pouvant aller jusqu’à 11%. La prise en compte de facteurs sociétaux, humains, géographiques, etc..., ressortant des sciences « molles » et se situant au-delà du cadre de cette étude, dépend du regroupement en question

et devrait permettre, à terme, d'identifier une solution s'inscrivant dans un cadre de développement durable.

## **Perspectives**

### Les réseaux d'eau multipolluants

Une évolution logique de ce travail de thèse concerne une étude approfondie des réseaux d'eau et parcs éco-industriels incluant plusieurs polluants. Ceci présente un intérêt dans le sens où l'eau de nombreuses activités industrielles telles que les raffineries ou les industries agroalimentaires, sont contaminées par divers polluants. Dans ce type d'industries, certaines unités de procédé peuvent nécessiter de fonctionner à des températures imposées impliquant l'introduction d'échangeurs de chaleur. Une procédure identique à celle qui a été utilisée pour les réseaux d'eau dans cette étude pourrait permettre d'étudier ce type de réseaux. La résolution d'un tel problème doit forcément passer par une résolution de type MINLP, tel que cela a été réalisé dans le chapitre III. Plusieurs approches numériques pourraient permettre de pallier les problèmes concernant la résolution de cas réels, par nature très complexes :

- La première consisterait à scinder le problème en sous-problèmes. Ceci permettrait de résoudre plus facilement des problèmes simplifiés de façon séquentielle.
- Selon les cas traités, il pourrait également être important de diminuer le nombre de critères progressivement, en analysant leurs interdépendances via des régressions linéaires ou non. Ceci entraînerait une diminution des temps de calcul non négligeable et ouvrirait la voie vers le traitement de problèmes de plus en plus complexes.

### Les parcs éco-industriels

Dans le cas des parcs éco-industriels, les industries qui se rassemblent sont souvent liées à des domaines industriels variés nécessitant la considération simultanée de nombreux objectifs antagonistes. Cependant, la prise en compte de critères sociétaux communs aux différentes industries du parc permettrait probablement d'augmenter le nombre de critères et de mieux adapter la formulation du problème au cas étudié. Les exigences sociétales

concernent par exemple la pérennité de l'emploi, mais aussi la garantie de sécurité totale d'un procédé pour les exploitants, les consommateurs et le public. De la même manière, la durabilité de l'entreprise pourrait mettre en avant un bénéfice sociétal supérieur à celui donné par des gains pécuniaires. Ces critères supplémentaires devraient être considérés dans un cadre global d'écologie industrielle.

Dans cette étude, les parcs éco-industriels sont étudiés en ne considérant uniquement des échanges instantanés (en régime permanent), la mise en œuvre de tels rassemblements industriels devra prendre en compte un système dynamique, plus réaliste, prenant en compte différents stockage entre les sites. En effet, le coût, lié au volume du stockage de l'eau pourrait également être introduit en tant que critère.

#### Vers un couplage de l'éco-conception et de l'écologie industrielle

L'étude de parcs éco-industriels du chapitre V se situe dans une démarche globale d'écologie industrielle (Figure VI-1). Cette dernière se définit comme un outil opérationnel de mise en œuvre des concepts de développement durable.

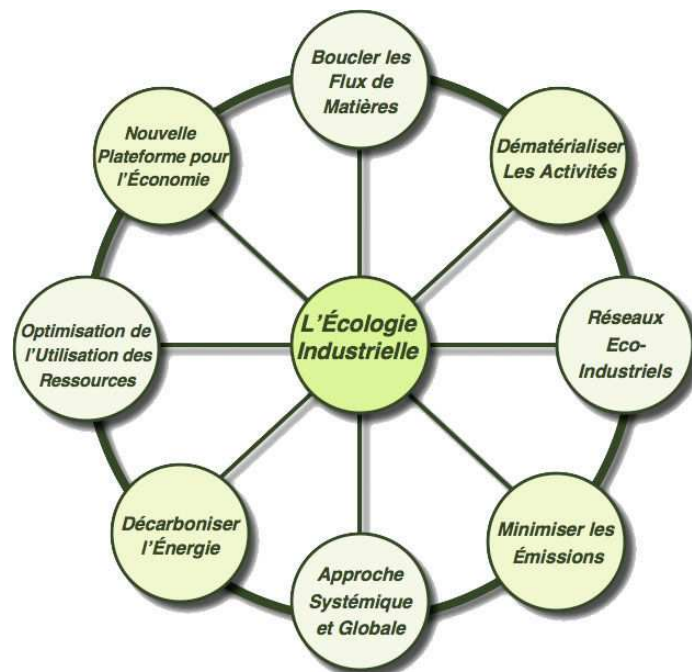


Figure VI-1. Concepts de l'écologie industrielle

Parallèlement au concept d'écologie industrielle, l'écoconception consiste à diminuer les impacts environnementaux par l'amélioration des procédés existants ou d'en imaginer de nouveaux qui évitent, ou à défaut qui minimisent la production de déchets à la source plutôt que de les collecter et/ou de les retraiter, passant ainsi d'une conception curative à une action préventive. Même si les deux approches ont un but environnemental commun, leurs objectifs diffèrent puisque l'écoconception vise les produits et services, tandis que l'écologie industrielle relève plutôt d'une démarche territoriale. Cette dernière agit à l'échelle de zones urbaines, d'activités tout en recherchant des symbioses industrielles efficaces d'un point de vue économique et sociétal.

Face à ces deux approches distinctes, une perspective intéressante serait un couplage des deux concepts puisque ceux-ci se révèlent être parfaitement complémentaires, œuvrant de fait pour un but commun. Ainsi, une modification et une amélioration du procédé via des analyses de cycle de vie selon les concepts d'écoconception pourraient, dans un premier temps, permettre d'obtenir des résultats répondant mieux aux exigences de l'écologie industrielle et de l'écoconception. Ce ne serait qu'*a posteriori*, après avoir effectué des choix stratégiques que le réseau global du parc éco-industriel considéré pourrait être optimisé selon la méthode proposée dans cette étude.



---

---

*Références bibliographiques*

---

---





- Ahmetovic, E., Grossmann, I.E., 2010. Strategies for the global optimization of integrated process water networks. *Comp. Aid. Chem. Eng.*, 28, 901-906.
- Allenby, B., 2006. The ontologies on industrial ecology? *Progress in Industrial Ecology, An. Int. J.* 3, 1-2, 28-40.
- Alva-Argaez, A., Kokossis, A., Smith, R., 2006. The design of water-using systems in petroleum refining using a water-pinch decomposition. *Chem. Eng. J.* DOI:10.1016/j.cej.2006.10.001.
- Ang, J.H., Goth, C.K., Teoh E.J., Mamun, A.A., 2007. Multiobjective evolutionary recurrent neural networks for system identification. *CEC'2007*, IEEE Press, Singapore, pp. 1586-1592.
- Aviso, K.B., Tan, R.R., Culaba, A.B., 2010a. Designing eco-industrial water exchange networks using fuzzy mathematical programming. *Clean Techn. Environ. Policy.* 12, 353-363.
- Aviso, K.B., Tan, R.R., Culaba, A.B., Cruz Jr, J.B., 2010b. Bi-level fuzzy optimization approach for water exchange in eco-industrial parks. *Process. Saf. Environ. Prot.* 88, 31-40.
- Baas, L., Boons, F., 2004. An industrial ecology project in practice: exploring the boundaries of decision-making levels in regional industrial systems. *J. Clean. Prod.* 12, 1073-1085.
- Bagajewicz, M.J., Rivas, M., Savelski, M.J., 2000. A robust method to obtain optimal and sub-optimal design and retrofits solutions of water utilization systems with multiple contaminants in process plants. *Comp. Chem. Eng.*, 24, 1461-1466.
- Bagajewicz, M., Savelski, M., 2001. On the use of linear models for the design of water utilization systems in process plants with a single contaminant. *Chem. Eng. Res. Des.* 79, 600-610.
- Bagajewicz, M., Rodera, H., Savelski, M., 2002. Energy efficient water utilization systems in process plants. *Comp. Chem. Eng.* 26, 59-79.
- Bagajewicz, M., Faria, D.C., 2009. On the appropriate architecture of the water/wastewater allocation problem in process plants. *Computer aided chemical engineering.* 26, 1-20.
- Bandyopadhyay, S., 2006. Source composite curve for waste reduction. *Chem. Eng. J.* 125, 99-110.
- BBC News Online, 2004. Water Scarcity: A Looming Crisis by Kirby, A. (19 October 2004) [www.news.bbc.co.uk](http://www.news.bbc.co.uk)
- Belkebir, M., Guiglion, C., Domenech, S., Pibouleau, L., 1989. Synthèse d'un réseau d'échangeurs de chaleur. *Chem. Eng. J.* 42, 119-133.
- Biegler, L., Grossmann, I., Westerberg, A., 1997. Systematic method of chemical process design. Prentice-Hall PTR, New Jersey, USA.

- Bierlaire, M., 2006. Introduction à l'optimisation différentiable. Presses Polytechniques Universitaires Romandes Editeur.
- Billen, G., Toussaint, F., Peeters, P., Sapir, M., Steenhout, A., Vanderborcht, J.P., 1983. L'écosystème Belgique. Essai d'écologie industrielle. Centre de recherché et d'information socio-politique CRISP, Bruxelles.
- Boeglin, J.C., 2001. L'eau et l'industrie. Techniques de l'ingénieur G1100 (<http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire>).
- Boeglin, J.C., 2007. Pollution industrielle de l'eau: caractérisation, classification et mesures. Techniques de l'ingénieur G1210 (<http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire>).
- Bogataj, M., Bagajewicz, M., 2008. Synthesis of non-isothermal heat integrated water networks in chemical processes. *Comp. Chem. Eng.* 32, 3130-3142.
- Boix, M., Montastruc, L., Pibouleau, L., Azzaro-Pantel, C., Domenech, S., 2010. Multiobjective optimization of industrial water networks with contaminants. *Computer aided chemical engineering*. 28, 859-864.
- Boix, M., Montastruc, L., Pibouleau, L., Azzaro-Pantel, C., Domenech, S., 2011. A multiobjective optimization framework for multicontaminant industrial water network design. *J. Env. Manag.* 92, 1802-1808.
- Bonami, P., Forrest, J.J., Ladanyi, L., Lee, J., Margot, F., Wächter, 2006. Bonmin: Basic Open-source Mixed Integer solver. <http://www.coin-or.org/Bonmin>. User's Manual.
- Bonami, P., Biegler L.T., Conn, A.R., Cornuéjols, G., Grossmann I.E., Laird C.D., Lee, J., Lodi, A., Margot, F., Sawaya, N., Wächter, A., 2008. An algorithmic framework for convex mixed integer nonlinear programs. *Tepper School of business*, paper 270.
- Cao, D., Feng, X., Ma, H., 2007. Pinch multi-agent algorithm for optimizing water-using networks. *Comp. Chem. Eng.* 31, 1565-1575.
- Chafekar, D., Shi, L., Radesh, K., Xuan, J., 2005. Constrained multi-objective GA optimization using reduced models, *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics* 32, 261-265.
- Chen, C.L., Hung, P.S., 2004. Simultaneous synthesis of flexible heat-exchange networks with uncertain source-stream temperatures and flow-rates. *Ind. Eng. Chem. Res.* 43, 5916-5928.
- Chen, C.L., Liao, H.L., Jia, X.P., Ciou Y.J., Lee J.Y., 2010. Synthesis of heat-integrated water-using networks in process plants. *J. Tawain Inst. Chem. Eng.* 41, 512-521.
- Chertow, M. R., 2000. Industrial symbiosis: Literature and taxonomy. *Annu. Rev. Energy Environ.* 25, 313-337.
- Chertow, M.R., 2007. "Uncovering" industrial symbiosis. *J. Ind. Ecol.* 11, 11-30.

- Chew, I.M.L., Tan, R.R., Ng, D.K.S., Foo, D.C.Y., Majoji, T., Gouws, J., 2008. Synthesis of direct and indirect interplant water network. *Ind. Eng. Chem. Res.* 47, 9485-9496.
- Chew, I.M.L., Tan, R.R., Foo, D.C.Y., Chiu, A.S.F., 2009. Game theory approach to the analysis of interplant water integration in an eco-industrial park. *J. Clean. Prod.* 17, 1611-1619.
- Chew, I.M.L., Foo, D.C.Y., Ng, D.K.S., Tan, R.R., 2010a. Flowrate targeting algorithm for interplant resource conservation network. Part 1: Unassisted integration scheme. *Ind. Eng. Chem. Res.* 49, 6439-6455.
- Chew, I.M.L., Foo, D.C.Y., Tan, R.R., 2010b. Flowrate targeting algorithm for interplant resource conservation network. Part 2: Assisted integration scheme. *Ind. Eng. Chem. Res.* 49, 6456-6468.
- Chew, I.M.L., Thillaivarna, S.L., Tan, R.R., Foo, D.C.Y., 2010c. Analysis of inter-plant water integration with indirect integration schemes through game theory approach: Pareto optimal solution with interventions. *Clean. Techn. Environ. Policy*. DOI: 10.1007/s10098-010-0280-x.
- Clement, R.A., 1927. *By-products in the packing industry*. University of Chicago Press.
- Coello Coello, C.A., Van Veldhuizen, D.A., Lamont, G.B., 2002. *Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems*. Kluwer Academic Publishers, New York 576 p.
- Cohen-Rosenthal, E., 2000. A walk on the human side of industrial ecology. *Amer. Behav. Scient.* 44, 245.
- Conover, W. R., 1918. Salvaging and utilizing wastes and scrap in industry. *Ind. M.* 55.6, 449-451.
- Côté, R., Cohen-Rosenthal, E., 1998. Designing eco-industrial parks: a synthesis of some experiences. *J. Clean. Prod.* 6, 181-188.
- Côté, R., 2008. Industrial ecology, industrial symbiosis and eco-industrial parks. *Asia-Pacific international workshop on industrial ecology*, 4-6.
- Crini, G., Badot P.M., 2007. *Traitement et épuration des eaux industrielles polluées*. Presse universitaire de Franche-Comté.
- Dhole, V.R., Ramchandani, N., Tainsh, R.A., Wasilewski, M., 1996. Make your process water pay for itself. *Chem. Eng.* 103, 100-103.
- Dong, H.G., Lin, C.Y., Chang, C.T., 2008. Simultaneous optimization approach for integrated water-allocation and heat-exchange networks. *Chem. Eng. Sci.* 63, 3664-3678.
- Dorigo, M., 1992. *Optimization, learning and natural algorithms*, PhD Thesis, Politecnico di Milano, Italy.
- Du, J., Meng, X.Q., Du, H.B., Yu, H.M., Fan, X.S., Yao, P.J., 2004. Optimal design of water utilization network with energy integration in process industries. *Chin. J. Chem. Eng.* 12, 247-255.

- Dunn, R.F., Wenzel, H., 2001. Process integration design methods for water conservation and wastewater reduction in industry Part I: design for single contaminants. *Clean Technol. Environ. Pol.* 3, 307-318.
- Dunn, R.F., Wenzel, H., Overcash, M.R., 2001. Process integration design methods for water conservation and wastewater reduction in industry Part II: design for multiple contaminants. *Clean Technol. Environ. Pol.* 3, 319-329.
- Dunn, R.F., El-Halwagi, M.M., 2003. Process integration technology review: background and applications in the chemical process industry. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 78, 1011-1021.
- Edgar, T.F., Himmelblau, D.M., Lasdon, L.S., 2001. Optimization of chemical processes. McGraw-Hill Professional Editor – Chemical Engineering series.
- Ehrenfeld, J., Gertler, N., 1997. Industrial ecology in practice: the evolution of interdependence at Kalundborg. *J. Ind. Ecol.* 1, 67-79.
- El-Halwagi, M.M., 1997. Pollution prevention through process integration—Systematic design tools, Academic Press, CA, USA.
- El-Halwagi, M.M., Gabriel, F., Harell, D., 2003. Rigorous graphical targeting for resource conservation via material recycle/reuse networks. *Ind. Eng. Chem. Res.* 42, 4319-4328.
- El-Halwagi, M.M., 2006. Process integration. Amsterdam: Elsevier.
- Engau, A., Wiecek, M.M., 2005. Generating epsilon efficient solutions in multiobjective programming, Technical Report TR2005 10 EWb, Clemson University, South Carolina, USA.
- Erol, P., Thöming, J., 2005. ECO-design of reuse and recycling networks by multi-objective optimization. *J. Clean Prod.* 13, 1492-1503.
- FAO-Aquastat (Food and Agriculture Organization of the United Nations), 2010. Base de données informatique de FAO-Aquastat: <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/main/index.stm>.
- de Faria, D.C., de Souza, A.A.U., Guelli Ulson de Souza, S.M.A, 2009. Optimization of water networks in industrial processes. *J. Clean Prod.* 17, 857-862.
- Farmani, R., Walters, G., Savic, D., 2006. Evolutionary multi-objective optimization of the design and operation of water distribution network: total cost vs. reliability vs. water quality, *J. Hydroinform.* 8, 165-179.
- Farmer, J.D., Packard, N., Perelson, A., 1986. The immune system, adaptation and machine learning. *Physica D* 22, 187-204.
- Feng, X., Seider, W., 2001. New structure and design methodology for water networks. *Ind. Eng. Chem. Res.* 40, 6140.
- Feng, X., Chu, K.H., 2004. Cost optimization of industrial wastewater reuse systems. *Proc. Safety Environ. Protection* 82, 249-255.

- Feng, X., Bai, J., Zheng, X.S., 2007. On the use of graphical method to determine the targets of single contaminant regeneration recycling water systems. *Chem. Eng. Sci.* 62, 2127-2138.
- Feng, X., Bai, J., Wang, H.M., Zheng, X.S., 2008. Grass-roots design of regeneration recycling water networks. *Comp. Chem. Eng.* 32, 1892-1907.
- Feng, X., Li, Y., Shen, R., 2009. A new approach to design energy efficient water allocation networks. *Appl. Therm. Eng.* 29, 2302-2307.
- Fletcher, R., Leyffer, S., Toint, P.L., 2000. On the global convergence of a filter-SQP algorithm. Dundee numerical analyses report na/197.
- Frosh, R.A., Gallopoulos, N.E., 1989. Strategies for manufacturing, *Sci. Am.* 261, 144-152.
- Galan, B., Grossmann, I.E., 1998. Optimal design of distributed wastewater treatment networks. *Ind. Eng. Chem. Res.* 37, 4036-4048.
- Garcia, J.S.D., Avila, S.L., Carpes, W.P., 2005. Introduction to optimization methods: a brief survey of methods. *IEEE multidisciplinary engineering education magazine* 2, 2-7.
- Gavrilescu, M., Teodoziu, C., Gavrilescu, D., Lupu, L., 2008. Strategies and practices for sustainable use of water in industrial papermaking processes. *Eng. Life Sci.* 8, 99-124.
- Geng, Y., Hengxin, Z., 2009. Industrial park management in the Chinese environment. *J. Clean. Prod.* 17, 1289-1294.
- Gibbs, D., Deutz, P., 2005. Implementing industrial ecology? Planning for eco-industrial parks in the USA. *Geoforum.* 36, 452-464.
- Gibbs, D., Deutz, P., 2007. Reflections on implementing industrial ecology through eco-industrial park development. *J. Clean. Prod.* 15, 1683-1695.
- Giurco, D., Bossilkov, A., Patterson, J., Kazaglis, A., 2010. Developing industrial water reuse synergies in Port Melbourne: cost effectiveness, barriers and opportunities. *J. Clean. Prod.* In Press.
- Gomes, F.S., Queiroz, E.M., Pessoa, F.L.P., 2007. Design procedure for water/wastewater minimization: single contaminant. *J. Clean. Prod.* 15, 474-485.
- Grossmann, I.E., 2005. Advances in logic-based optimization approaches to process integration and supply chain management. Chapter 11 in "Chemical engineering trends and development" Wiley West Sussex Editor, pp. 299-322.
- Grossmann, I.E., Caballero, J.A., Yeomans, H., 2000. Advances in mathematical programming for the synthesis of process systems. *Latin Amer. App. Res.* 30, 263-284.
- Gugenheim, D., 2011. Optimisation du dimensionnement et de l'exploitation des réseaux de transport de gaz. Rapport de thèse. Institut National Polytechnique de Toulouse, France.
- Guiglion, C., Domenech, S., Pibouleau, L., 1989a. Récupération optimale de l'énergie dans les réseaux d'échangeurs de chaleur – I. Etude théorique. *Int. J. Heat Mass Transf.* 32, 243-250.

- Guiglion, C., Domenech, S., Pibouleau, L., Belkebir, M., 1989b. Récupération optimale de l'énergie dans les réseaux d'échangeurs de chaleur – II. Etude théorique. *Int. J. Heat Mass Transf.* 32, 251-260.
- Gunaratnam, M., Alva-Argaez, A., Kokossis, A., Kim, J.K., Smith, R., 2005. Automated design of total water system. *Ind. Eng. Chem. Res.* 44, 588.
- Hall, C.A.S., 1975. Look what's happening to our Earth. The biosphere, the industriosphere and their interactions. *Bull. Atom. Scient.* 31, 11-21.
- Hallale, N., 2002. A new graphical targeting method for water minimisation. *Adv. Environ. Res.* 6, 377-390.
- Han, I.S., Han, C., Chung, C.B., 2004. Optimization of the air- and gas-supply network of a chemical plant. *Chem. Eng. Res. Des.* 82, 1337-1343.
- Heeres, R.R., Vermeulen, W.J.V., de Walle, F.B., 2004. Eco-industrial parks initiatives in the USA and the Netherlands: first lessons. *J. Clean. Prod.* 12, 985-995.
- Hernandez-Rodriguez, G., 2011. An optimization-oriented framework for natural gas pipelines: a brief approach for evaluating the hydrogen injection. Rapport de these, Institut National Polytechnique de Toulouse, France.
- Holland, J.H., 1975. Adaptation in natural and artificial systems. Ann Arbor University of Michigan Press.
- Huang, C.H., Chang, C.T., Ling, H.C., Chang, C.C., 1999. A mathematical programming model for water usage and treatment network design. *Ind. Eng. Chem. Res.* 38, 2666-2679.
- Iancu, P., 2007. Process integration for water minimisation in oil processing and petrochemistry. PhD Thesis Report, Bucarest.
- IFEN (Institut Français de L'environnement), 2006. L'environnement en France. Les Synthèses Editions Orléans, France.
- Isafiade, A.J., Fraser, D.M., 2008. Interval-base MINLP superstructure synthesis of heat exchanger networks. *Chem. Eng. Res. Des.* 86, 245-257.
- Jacob, J., Viviant, C., Houle, H.F., Paris, J., 2002. Analyse et optimisation des réseaux d'eau dans les procédés de fabrication des pâtes et papiers: La technique du pincement à l'œuvre. *Pulp Pap. Can.* 103, 24-27.
- Jacobsen, N.B., 2006. Industrial symbiosis in Kalundborg, Denmark: a quantitative assessment of economic and environmental benefits. *J. Ind. Ecol.* 10, 239-256.
- Jezowski, J., Bochenek, R., Poplewski, G., 2007. On application of stochastic optimization techniques to designing heat exchanger and water networks. *Chem. Eng. Process.* 46, 1160-1174.
- Jezowski, J., 2008. Review and analysis of approaches for designing optimum industrial water networks. *Chem. Proc. Eng.* 29, 663-681.

- Jidong, L., Yanling, H., Xudong, Z., Guodong, W., 2008. Pinch technology reduces wastewater at a paper mill. *Bioinfo. Biomed. Eng.* 2753-2756.
- Karuppiah, R., Grossmann, I.E., 2006. Global optimization for the synthesis of integrated water systems in chemical processes. *Comp. Chem. Eng.* 30, 650-673.
- Kazantzi, V., El Halwagi M.M., 2005. Targeting material reuse via property integration. *Chem. Eng. Prog.* 101, 28-37.
- Keedwell, E., Khu, S.T., 2005. A hybrid genetic algorithm for the design of water distribution networks. *Eng. Appl. Artif. Intell.* 18, 461-472.
- Kennedy, J., Eberhart, R.C., 1995. A new optimizer using particle swarm theory. In "Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks", Piscataway, NJ, pp. 1942-1948.
- Kim, I.Y., de Weck, O.L., 2005. Adaptive weighted-sum method for bi-objective optimization: Pareto front generation. *Struct. Multidisc. Optim.* 29, 149-158.
- Kim, S.H., Yoon, S-G., Chae, S.H., Park, S., 2010. Economic and environmental optimization of a multi-site utility network for an industrial complex. *J. Environ. Manag.* 91, 690-705.
- Kirkpatrick, S., Gellat, C.D., Vecchi, M.P., 1983. Optimization by simulated annealing, *Science* 220, 671-680.
- Klimes, J., Nenov, N., Kimenov, P., Mintchev, M., 1999. Heat integration in food industry. *Int. Tech. Energ. Sav.* 4, 9-26.
- Koller, T., Stocks, H.B., 1918. The utilization of waste products: a treatise on the rational utilization, recovery, and treatment of waste products of all kinds. Scott Greenwood and son Editor. 338p.
- Koppol, A., Bagajewicz, M., Dericks, B., Savelski, M., 2004. On zero water discharge solutions in the process industry. *Adv. Environ. Res.* 8, 151-171.
- Kuo, W.-C.J., Smith, R., 1998. Designing for the interactions between water use and effluent treatment. *Chem. Eng. Res. Des.* 76, 287-301.
- Lavric, V., Iancu, P., Plesu, V., 2005. Genetic algorithm optimisation of water consumption and wastewater network topology. *J. Clean. Prod.* 13, 1405-1415.
- Leewongtanawit, B., Kim, J.K., 2008. Synthesis and optimization of heat-integrated multiple-contaminant water systems. *Chem. Eng. Proc.* 47, 670-694.
- Linderoth, J.T., Ralphs, T.K., 2005. Noncommercial software for mixed-integer linear programming. In "Integer programming: theory and practice" John Karlof Editor, 253.
- Lim, S.R., Park, J.M., 2008. Cooperative water network system to reduce carbon footprint. *Environ. Sci. Technol.* 42, 6230-6236.
- Linnhoff, B., Flower, J., 1978. Synthesis of heat exchanger network. *A. I. Ch. J.* 24, 633-654.

- Linnhoff, B., David, R.M., Wardle, I., 1979. Understanding heat exchanger networks. *Comput. Chem. Eng.* 3, 295-302.
- Linnhoff, B., Townsend, D.W., Boland, D., Hewitt, G.F., Thomas, B.E.A., Guy, A.R., Marsland, R.H., 1982. User guide on process integration for the efficient use of energy. *Instit. Chem. Eng., Rugby, UK*
- Linnhoff, B., Hindmarsh, E., 1983. The pinch design method for heat exchanger networks. *Chem. Eng. Sci.* 38, 745-763.
- Liwerska-Bizukojc, E., Bizukojc, M., Marcinkowski, A., Doniec, A., 2009. The conceptual model of an eco-industrial park based upon ecological relationships. *J. Clean. Prod.* 17, 732-741.
- Liu, C., Zhang, K., Zhang, J., 2010. Sustainable utilization of regional water resources: experiences from the Hai Hua ecological industry pilot zone (HHEIPZ) project in China. *J. Clean Prod.* 18, 447-453.
- Lovelady, E.M., El-Halwagi, M.M., 2009. Design and integration of eco-industrial parks for managing water resources. *Environ. Prog. Sustain. Energ.* 28, 265-272.
- Lowe, E., Moran, S., Holmes, D., 1996. Fieldbook for the development of eco-industrial parks. *Indigo Dev.* 2, final report.
- Lowe, E., 1997. Creating by-product resource exchanges: strategies for eco-industrial parks. *J. Cleaner Prod.* 5, 57-65.
- Manan, Z.A., Wan Alwi, S.R., Ujang, Z., 2006. Water pinch analysis for an urban system: a case study on the Sultan Ismail Mosque at the Universiti Teknologi Malaysia (UTM). *Desalination.* 194, 52-68.
- Manan, Z.A., Tea, S.Y., Wan Alwi, S.R., 2009. A new technique for simultaneous water and energy minimisation in process plant. *Chem. Eng. Res. Des.* 87, 1509-1519.
- Mann, J., Liu, A.Y., 1999. *Industrial water reuse and wastewater minimization.* McGraw-Hill Professional Editor.
- Maier, H.R., Simpson, A.R., Zecchin, A.C., Foong, W.K., Phang, K.Y., Seah, H.Y., Tan, C.L., 2003. Ant colony optimization for design of water distribution systems. *J. Water Res. Plann. Manag.* 129, 200-209.
- Marglin, S., 1967. *Public investment criteria.* Cambridge, M.A: MIT press.
- Mariano-Romero, C.E., Alcocer-Yamanaka, V.H., Morales, E.F., 2007. Multi-objective optimization of water-using systems. *Eur. J. Oper. Res.* 181, 1691-1707.
- Mavrotas, G., 2009. Effective implementation of the  $\epsilon$ -constraint method in multi-objective mathematical programming problems. *Appl. Math. Comp.* 213, 455-465.
- Messine, F., 2006. *L'optimisation globale par intervalles : de l'étude théorique aux applications,* HDR, INPT.



- Mirata, M., 2004. Experiences from early stages of a national industrial symbiosis programme in the UK: determinants and coordination challenges. *J. Clean. Prod.* 12, 967–983.
- Miettinen, K., 1999. *Nonlinear multiobjective optimization*, Kluwer Academic Publishers, Boston.
- Nakrani, S., Tovey, S., 2004. On honey bees and dynamic server allocation in Internet hosting centers, *Adapt. Behav.* 12, 223-240.
- OECD (Organization for Economic Co-operation and Development), 2008. *OECD environmental outlook to 2030*, Paris.
- Oh, D.S., Kim, K.B., Jeong, S.Y., 2005. Eco-industrial park design: a Daedeok Technovalley case study. *Habitat Int.* 29, 269-284.
- Olesen, S.G., Polley, G.T., 1996. Dealing with plant geography and piping constraints in water network design. *Trans. I. Chem. E.* 74, 273-276.
- ONEMA (Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques), 2009. *Le système d'information sur l'eau : un dispositif fondamental de la politique de l'eau. Dossier Mars 2009.*
- Park, H.S., Rene, E.R., Choi, S.M., Chiu, A.S.F., 2008. Strategies for sustainable development of industrial park in Ulsan, South Korea - From spontaneous evolution to systematic expansion of industrial symbiosis. *J. Environ. Manag.* 87, 1-13.
- Ponsich, A., 2005. *Strategies d'optimisation mixte en genie des procédés – application à la conception d'ateliers discontinus. Rapport de these, Institut National Polytechnique de Toulouse, France.*
- Poplewski, G., 2004. *Water network optimization. PhD thesis, University of technology, Rzeszow, Poland.*
- Poplewski, G., Walczyk, K., Jezowski, J., 2010. Optimization-based method for calculating water networks with user specified characteristics. *Chem. Eng. Res. Des.* 88, 109-120.
- Poplewski, G., Jezowski, J., Jezowska, A., 2011. Water network design with stochastic optimization approach. *Chem. Eng. Res. Des.*, In press.
- Prakash, R., Shenoy, U.V., 2005. Targeting and design of water networks for fixed flowrate and fixed contaminant load operations. *Chem. Eng. Sci.* 60, 255-268.
- Prakotpol, D., Srinophakun, T., 2004. GAPinch: genetic algorithm toolbox for water pinch technology. *Chem. Eng. Proc.* 43, 203-217.
- PRB (Population Reference Bureau), 2009. *World population data sheet*, Washington.
- Quesada, I., Grossmann, I.E., 1995. Global optimization of bilinear process networks with multicomponent flows. *Comp. Chem. Eng.* 19, 1219-1242.
- Ren, L., Zhang, Y., Wang, Y., Sun, Z., 2007. Comparative analysis of a novel M-TOPSIS method and TOPSIS. *Appl. Math. Res. Exp.* 1.

- Reniers, G., Dullaert, W., Visser, L., 2010. Empirically based development of a Framework for advancing and stimulating collaboration in the chemical industry (ASC) : creating sustainable chemical industrial parks. *J. Cleaner. Prod.* 18, 1587-1597.
- Roberts, B.H., 2004. The application of industrial ecology principles and planning guidelines for the development of eco-industrial parks: an Australian case study. *J. Clean. Prod.* 12, 997-1010.
- Rossiter, A., Ravi, N., 1995. Wastewater minimization using Nonlinear programming. In "Waste minimization through process design" McGraw-Hill Professional Editor, pp 225-243.
- Savelski M. J., Rivas, M., Bagajewicz, M.J., 1999. Efficient use and reuse of water in refineries and process plants. ENPROMER'99- II Congresso de Engenharia de Processos do MERCOSUL, Florianópolis - Santa Catarina – Brasil.
- Savelski, M., Bagajewicz, M., 2000. On the optimality conditions of water utilization systems in process plants with single contaminants. *Chem. Eng. Sci.* 55, 5035-5048.
- Savelski, M., Bagajewicz, M., 2003. On the necessary conditions of optimality of water utilizations systems in process plants with multiple contaminants. *Chem. Eng. Sci.* 58, 5349-5362.
- Savulescu, L.E., Kim, J.K., Smith, R., 2005a. Studies on energy and water minimization – Part I: systems with no water re-use. *Chem. Eng. Sci.*, 2005 60, 3279-3290.
- Savulescu, L.E., Kim, J.K., Smith, R., 2005b. Studies on energy and water minimization – Part II: systems with maximum re-use of water. *Chem. Eng. Sci.* 60, 3291-3308.
- Shafiei, S., Domenech, S., Koteles, R., Paris, J., 2004. System closure in pulp and paper mills: network analysis by genetic algorithm. *J. Clean. Prod.* 12, 131-135.
- Shi, H., Chertow, M., Song, Y., 2010. Developing country experience with eco-industrial parks: a case study of the Tianjin Economical-Technological Development Area in China. *J. Clean. Prod.* 18, 191-199.
- Simmonds, P. L. 1862. Waste products and undeveloped substances. London: Hardwicke.
- Statyukha, G., Kvitka, O., Dzhygyrey, I., Jezowski, J., 2008. A simple sequential approach for designing industrial wastewater treatment networks. *J. Cleaner Prod.* 16, 215-224.
- Sue, M.H., Lee, T.Y., 2002. Robust optimal design of wastewater reuse network of plating process. *J. Chem. Eng.* 35, 863-873.
- Taal, M., Bulatov, I., Klemes, J., Stehlik, P., 2003. Cost estimation and energy price forecast for economic evaluation of retrofit projects. *Appl. Therm. Eng.* 23, 1819-1835.
- Tabkhi, F., 2007. Optimization of gas transmission networks. Rapport de thèse, Institut National Polytechnique de Toulouse, France.
- Takama, N., Kuriyama, T., Shiroko, K., Umeda, T., 1980. Optimal water allocation in a petroleum refinery. *Comp. Chem. Eng.* 4, 251-258.

- Tamaki, H., Kita, H., Kobayashi, S., 1996. Multiobjective optimization by genetic algorithms: a review. IEEE International Conference on Evolutionary Computation, ICEC 1996, Nagoya, Japan.
- Tanyimboh, T.T., Ward, K., Prasad, T., Jarvis, E., Kanyoza, A., 2010. Multiobjective optimization and multicriteria decision making for water networks. In: "Integrating Water Systems" Boxall & Maksimovic Editor, pp. 277-283.
- Tan, Y.L., Manan, Z.A., Foo, D.C.Y., 2007. Retrofit of water network with regeneration using water pinch analysis. Proc. Saf. Environ. Protec. 85, 305-317.
- Teles, J.P., Castro, P.M., Novais, A.Q., 2009. MILP-based initialization strategies for the optimal design of water-using networks. Chem. Eng. Sci. 64, 3736-3752.
- Thevendiraraj, S., Klemes, J., Paz, D., Aso, G., Cardenas, G.J., 2003. Water and wastewater minimization study of a citrus plant. Resources Cons. Recycl. 37, 227-250.
- Tiejun, D., 2010. Two quantitative indices for the planning and evaluation of eco-industrial parks. Res. Conserv. Recycle. 54, 442-448.
- Tsai, M.J., Chang, C.T., 2001. Water usage and treatment network design using genetic algorithm. Ind. Eng. Chem. Res. 4, 4874-4888.
- Tudor, R., Lavric, V., 2010. Optimization of total networks of water-using and treatment units by genetic algorithms. Ind. Eng. Chem. 49, 3715-3731.
- Tudor, T., Adam, E., Bates, M., 2007. Drivers and limitations for the successful development and functioning of EIPs (eco-industrial parks): A literature review. Ecol. Econ. 61,199-207
- UNESCO (United Nations Educational Scientific and Cultural Organization), 2009. Water in a changing world. The United Nations world water development, Report 3.
- Vamvakeridou-Lyroudia, L.S., Walters, G.A., Savic, D.A.,2005. Fuzzy multiobjective design optimization of water distribution networks. Jour. Wat. Res. Plan. Man. ASCE, 131, 467-476.
- Van Beers, D., Corder, G., Bossilkov, A., Van Berkel, R., 2007. Industrial symbiosis in the Australian minerals industry: the cases of Kwinana and Gladstone. J. Ind. Ecol. 11, 55-72.
- Van Berkel, R., 2007. Cleaner production and eco-efficiency initiatives in Western Australia 1996-2004. J. Clean. Prod. 15, 741-755.
- Van Leeuwen, M.G., Vermeulen, W.J.V., Glasbergen P., 2003. Planning eco-industrial parks: an analysis of Dutch planning methods. Bus. Strat. Environ.12, 147-162.
- Veiga, E., Bechara, L., Magrini, A., 2009. Eco-industrial park development in Rio de Janeiro, Brazil: a tool for sustainable development. J. Clean. Prod. 17, 653-661.
- Wächter, A., Biegler, L.T., 2006. On the Implementation of an Interior-Point Filter Line-Search Algorithm for Large-Scale Nonlinear Programming. Math. Prog. 106, 25-57.

- Wan Alwi, S.R., 2007. A new holistic framework for cost effective minimum water network design. PhD thesis, University of technology, Malaysia.
- Wan Alwi, S.R., Manan, Z.A., Samingin, M.H., Misran, N., 2008. A holistic framework for design of cost effective minimum water utilization network. *J. Env. Manag.* 88, 219-252.
- Wang, Y.P., Smith, R., 1994. Wastewater minimization. *Chem. Eng. Sci.* 49, 981-1006.
- Wang, Y.P., Smith, R., 1995. Wastewater minimization with flowrate constraints. *Trans. IChemE.* 73, part A, 889.
- Wenzel, H., Dunn, R.F., Gottrup, L., Kringelum, J., 2002. Process integration design methods for water conservation and wastewater reduction in industry Part III: design for multiple contaminants. *Clean Technol. Environ. Pol.* 4, 16-25.
- World Resources Institute, 2009. Annual report 2009, Washington.
- World Water Council, 2010. L'eau, priorité mondiale – Rapport d'activités 2010 du Conseil Mondial de l'Eau, Marseille.
- Worster, D., 1977. Nature's economy: the roots of ecology. Sierra Club Books Editor, San Francisco.
- Wright, D.G., Woods, D.R., 1993. Evaluation of capital cost data. Part 7: Liquid waste disposal with emphasis on physical treatment. *Can. J. Chem. Eng.* 71, 575-590.
- Wright, D.G., Woods, D.R., 1994. Evaluation of capital cost data. Part 8: Liquid waste disposal with emphasis on biological treatment. *Can. J. Chem. Eng.* 72, 342-351.
- Yang, Y.H., Lou, H.H., Huang, Y.L., 2000. Synthesis of an optimal wastewater reuse network. *Waste Manag.* 20, 311-319.
- Yee, T.F., Grossmann, I.E., Kravanja, Z., 1990. Simultaneous optimization models for heat integration - I. Area and energy targeting and modelling of multi-stream exchangers. *Comp. Chem. Eng.* 14, 1151-1164.
- Zadeh, L., 1963. Optimality and non-scalar-valued performance criteria. *IEEE Trans. Autom. Control.* 8, 59-60.
- Zheng, P., Feng, X., Cao, D., 2003. Design water allocation network with minimum fresh water and energy consumption. *Comp. Aid. Chem. Eng.* 15, 388-393.
- Zheng, P., Feng, X., Qian, F., Cao, D., 2006. Water system integration of a chemical plant. *Energy Conv. Manag.* 47, 2470-2478.
- Zhu, X.X., Zanfir, M., Klemes, J., 2000. Heat transfer enhancement for heat exchanger network retrofit. *Heat Transf. Eng.* 21, 7-18.
- Zhu, L., Zhou, J., Cui, Z., Liu, L., 2010. A method for controlling enterprises access to an eco-industrial park. *Sci. Total Environ.* 408, 4817-4825.