

# Optimisation multicritère des consommations d'eau et d'énergie dans un Eco Parc Industriel

MARIANNE BOIX, LUDOVIC MONTASTRUC, LUC PIBOULEAU, CATHERINE AZZARO-PANTEL,  
SERGE DOMENECH

Laboratoire de Génie Chimique (LGC-CNRS-INPT); Université de Toulouse  
4 Allée Emile Monso, BP 84234, 31432 Toulouse Cedex 4, France  
Ludovic.Montastruc@ensiacet.fr

---

## Résumé

Les réseaux d'eaux industrielles sont conçus par une optimisation multi-objectif, où les débits de l'eau douce régénérée ainsi que le nombre de connexions de réseau (variables entières) sont minimisés simultanément. En exprimant les équations de bilans en termes de flux de matières partiels, le problème peut être formulé comme un problème de programmation linéaire avec variables mixtes (MILP), résolu par la méthode de  $\epsilon$ -contrainte. La stratégie MILP est mise en œuvre pour la conception d'un éco parc industriel (EIP) impliquant trois entreprises. Trois scénarii sont considérés : EIP sans unité de régénération, EIP où chaque société est propriétaire de son unité de régénération et EIP où les trois entreprises partagent des unités de régénération. Trois unités de régénération possible peuvent être choisies, et la procédure MILP est résolue selon de deux types de conditions : nombre limité ou non de connexions, des gains identiques ou différents pour chaque entreprise. Tous ces cas sont comparés selon le coût équivalent exprimé en eau douce et en tenant également compte de la complexité du réseau à travers le nombre de connexions. La meilleure solution EIP pour les trois entreprises peut être déterminée.

## Abstract –

Industrial water networks are designed by means of multiobjective optimization, where fresh water, regenerated water flow-rates as well as the number of network connections (integer variables) are simultaneously minimized. By expressing balance equations in terms of partial mass flows, the problem can be formulated as a Mixed-Integer Linear Programming (MILP) problem, solved by the  $\epsilon$ -constraint method. The approach is validated on a published example. In the second part the MILP strategy is implemented for designing an Eco Industrial Park (EIP) involving three companies. Three scenarios are considered: EIP without regeneration unit, EIP where each company owns its regeneration unit and EIP where the three companies share regeneration unit(s). Three possible regeneration units can be chosen, and the MILP is solved under two kinds of conditions: limited or unlimited number of connections, same or different gains for each company. All these cases are compared according to the global equivalent cost expressed in fresh water and taking also into account the network complexity through the number of connections. The best EIP solution for the three companies can be determined.

**Mots clés** – Réseau, optimisation multiobjectif, Parc éco-industriel, Eau, Chaleur.

**Keywords** – Network, Multiobjective optimization, Eco Industrial Park, Water, Energy

---

## 1 INTRODUCTION

Le développement durable évoqué en 1987 par le rapport Brundtland correspond à une nouvelle ère de croissance économique qui est censée réduire les déséquilibres importants dans le monde. Le développement durable tient compte à la fois de l'aspect économique, environnement et social.

De nombreux modèles économiques ont été développés (Vivien, 2005). On peut en citer trois :

- l'économie de fonctionnalité c'est-à-dire vendre l'usage du produit et non le produit.
- des modèles de soutenabilité faible, c'est-à-dire trouver un compromis entre l'économie néoclassique et le développement soutenable. En effet, dans ces modèles, il est préféré une croissance des capitaux tout en privilégiant la technicité et la recherche de nouvelles méthodes pour léguer aux prochaines générations le plus grand capital naturel (courbe de Kuznets, 1955).

- Des modèles de soutenabilité forte soit un modèle économique qui préserve l'intégralité du capital naturel.

L'écologie industrielle est un domaine d'application des modèles économiques de soutenabilité faible qui contribue à répondre aux enjeux du développement durable. A l'échelle d'un territoire, la mise en œuvre d'une démarche d'écologie industrielle d'après R. Frosch et N. Gallopoulos en 1989, appelée symbiose industrielle, permet un développement plus durable des activités économiques, d'un point de vue environnemental.

La transformation de la société industrielle peut porter sur les six pistes opérationnelles mises en évidence par H. Tibbs (1993) dans le but de vulgariser et rendre applicable le principe de l'écologie industrielle, décrit par R. Frosch et N. Gallopoulos (1989):

- boucler les flux de matière et d'énergie entre acteurs de telle sorte que les déchets des uns constituent des ressources pour d'autres ;
- équilibrer les flux entrants et sortants du système industriel en fonction des capacités de l'écosystème naturel à renouveler les ressources disponibles et à absorber les rejets et les émissions polluantes ;
- réduire l'intensité énergétique et dématérialiser les procédés industriels ;
- limiter les pertes dissipatives liées à l'usage de substances chimiques ;
- décarboniser l'énergie ;
- adopter de nouvelles politiques sur les plans nationaux et internationaux intégrant avec cohérence les aspects économiques, environnementaux et réglementaires.

J. Ehrenfeld (1997) a ajouté à cette liste une septième piste d'action consistant à créer de nouvelles structures permettant la coordination, la communication et l'échange d'information entre les acteurs de manière à faciliter l'action.

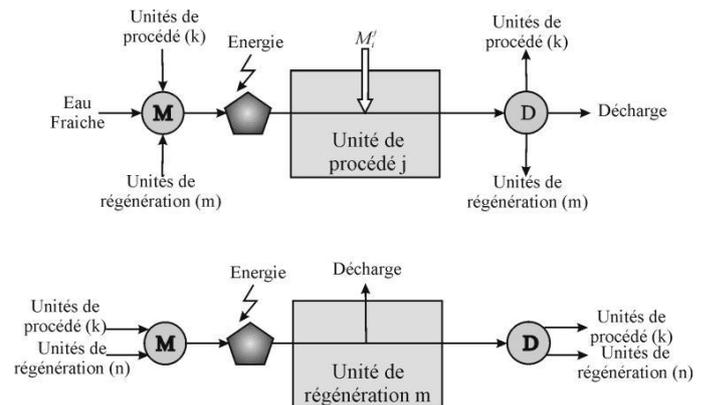
L'application du premier principe revient à créer ce qui est communément appelé une symbiose industrielle. Celle-ci repose sur l'échange de flux de matière, d'énergie ou d'eau entre des acteurs économiques, de telle sorte que les déchets ou co-produits des uns deviennent des ressources pour d'autres, conduisant à valoriser la totalité des matières premières en y recyclant les éléments. En s'inspirant du fonctionnement des écosystèmes naturels, il s'agit de créer des « chaînes alimentaires industrielles » (Erkman, 2004) à l'intérieur d'un écosystème industriel. Cependant, Chertow (2007) propose comme élément précurseur d'un écoparc industriel, le réseau d'eau. C'est pour cette raison que nous nous sommes intéressés dans un premier temps à cette problématique en particulier à la résolution d'une optimisation multiobjectif.

Les problèmes d'allocation de réseaux d'eau ont été résolus par différentes techniques. Elles incluent des méthodes graphiques, en impliquant souvent l'analyse du pincement hydraulique (Dunn et Wenzel, 2001), des résolutions par le biais de programmation mathématique (Bagajewicz et Savelski, 2001; Feng et al., 2008 ; Chen et al., 2010, Boix et al., 2011) et enfin la synthèse des réseaux d'échangeurs de masse (El-Halwagi, 1997). Outre les méthodes graphiques, limitées aux réseaux monopolluants, l'approche la plus largement utilisée est la méthode de programmation mathématique linéaire (Mixed Integer Linear Programming, MILP) ou non linéaire (Mixed Integer Non Linear Programming, MINLP). La première est généralement restreinte aux réseaux d'eau simples, contenant un seul polluant tandis que la seconde, plus générique, s'étend à tous les réseaux. Peu d'études proposent une optimisation multiobjectif de ce type de problème malgré la réelle nécessité de prendre en compte des critères économiques, environnementaux ou topologiques.

Dans cette étude, les cas les plus représentatifs de réseaux industriels sont abordés et optimisés de façon à offrir des solutions concrètes au plus grand nombre d'industries. Le but de l'étude est de proposer une méthodologie applicable aux réseaux les plus complexes comme dans le cas de parcs éco-industriels en considérant plusieurs critères.

## 2 SUPERSTRUCTURE ET FORMULATION GENERALE

La superstructure générale d'un réseau est représentée sur la figure 1 : à partir d'un nombre connu de procédés, d'unités de régénération et de polluants, toutes les connexions entre ces différents modules sont possibles. Sont seulement exclues les redistributions d'eau usée au même procédé et à la même unité de régénération. Le problème est abordé sous forme de « boîtes noires » dans un but de généralisation des cas traités. Les paramètres connus diffèrent en fonction du réseau optimisé, d'une façon générale ils regroupent : les concentrations d'entrée et de sortie maximales des procédés, les concentrations post-régénérations et selon les cas, les températures de fonctionnement, les débits d'eau maximaux et les concentrations en polluants à la décharge.



**Figure 1. Superstructure générale d'un réseau d'eau et de chaleur**

D'une façon générique, la programmation mathématique du problème d'allocation fait intervenir des équations pour les bilans totaux de matière et d'énergie et pour les contraintes imposées par les concentrations d'entrée et de sortie des différents modules composant le réseau. Ainsi, il s'agit d'un ensemble d'équations de bilans et de contraintes non linéaires. De plus, la présence ou non des connexions et des échangeurs de chaleur (selon les cas) dans le réseau est prise en compte par le biais de variables binaires conduisant à un problème de type MINLP. Pour le cas des réseaux d'eau monopolluants, une simplification permet de résoudre le problème à l'aide d'un programme de type MILP. En effet, les contraintes sur les concentrations initialement exprimées sous forme de contraintes inégalités peuvent être transformées en égalités en fixant la concentration de sortie de chaque procédé à sa valeur maximale.

Ainsi le problème est composé des équations et des contraintes suivantes :

- bilan massique partiel sur le procédé j pour l'eau
- bilan massique partiel sur le procédé j pour le polluant
- bilan massique partiel sur l'unité de régénération m pour l'eau
- bilan massique partiel sur l'unité de régénération m pour le polluant
- bilan massique partiel d'eau entrant et sortant du réseau
- bilan massique partiel du polluant entrant et sortant du réseau
- contrainte sur la concentration maximale en polluant d'entrée du procédé j
- contrainte sur la concentration maximale en polluant à la sortie du procédé j
- contrainte sur la concentration maximale en polluant à la sortie de l'unité de régénération m

- bilan du flux énergétique pour le procédé j
- bilan du flux énergétique pour l'unité de régénération
- bilan du flux énergétique pour la décharge
- contrainte sur la température du procédé j
- contrainte sur la température de l'unité de régénération m
- contrainte sur la température de la décharge

Les trois critères que l'on optimise simultanément sont:

- le débit d'eau fraîche global entrant dans le réseau F1,
- le débit d'eau à l'entrée des unités de régénération F2,
- le nombre d'interconnexions dans le réseau F3.

Ce problème multiobjectif est résolu à l'aide d'une optimisation lexicographique (Mavrotas, 2009) basée sur une " méthode aller-retour", inspirée de la stratégie  $\epsilon$ -contrainte. Ceci consiste en une étape "aller" qui a pour but de minimiser le premier objectif alors que le second est introduit dans le problème en tant que contrainte bornée. L'étape « retour » consiste en l'optimisation du deuxième objectif alors que c'est le premier qui est inclus et borné dans un intervalle de valeurs où la valeur médiane est la valeur optimale obtenue dans l'étape aller. Durant ces deux étapes « aller-retour », le troisième objectif est fixé en tant que valeur entière entre le nombre minimal d'interconnexions et toutes les connexions faisables. Cette procédure permet de prendre en compte les trois objectifs de façon simultanée et de construire un front de Pareto pour chaque valeur du nombre d'interconnexions qui représente la complexité du réseau. Rappelons qu'un front de Pareto est l'ensemble des solutions efficaces (non dominées) pour un problème multiobjectif; il s'agit d'une courbe d'équilibre. En effet, il est toujours préférable d'offrir aux praticiens industriels un large éventail de solutions afin de permettre de faire leur choix à l'aide de la stratégie proposée et également en fonction de certaines règles internes spécifiques de leur société.

De l'étude théorique, les "bonnes" solutions d'un point de vue industriel, sont recherchées en introduisant l'indicateur «GEC», défini ci-après.

GEC est un indicateur économique, le Coût Equivalent Global à débit d'eau défini par :

$GEC = F1 + R + W$  où F1 est le débit d'eau fraîche, R et W sont les contributions des eaux régénérées et déchets, avec  $R = \alpha F2$  et  $W = \beta Fw$  où F2 est le débit des eaux régénérées et Fw celui des eaux usées rejetées à l'égout.

$\alpha$  varie selon le type d'unité de régénération (voir tableau 1) et  $\beta$  est fixé à 5.625 (Bagajewicz et Faria ,2009).

**Tableau 1. Valeurs de  $\alpha$  pour les différents types de régénération**

| Type de l'unité de Régénération | Concentration de sortie (ppm) | Valeur de $\alpha$ |
|---------------------------------|-------------------------------|--------------------|
| <b>I</b>                        | 50                            | 0.375              |
| <b>II</b>                       | 20                            | 1.75               |
| <b>III</b>                      | 5                             | 3.125              |

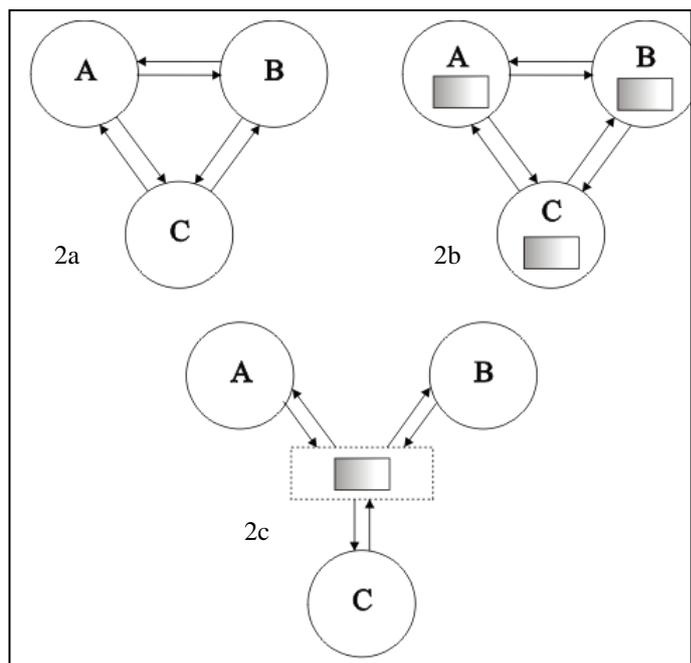
La conception des EIP pour la gestion des eaux industrielles est illustrée par l'exemple proposé par Olesen et Polley (1996). L'EIP est ici composé par trois entreprises A, B et C impliquant chacune cinq procédés ; les données sont rapportées dans le tableau 6.

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 2a).
- Les entreprises investissent chacune dans une unité de régénération (Figure 2b).
- Une seule unité de régénération commune est utilisée par l'EIP (Figure 2c).



**Figure 2. Différentes configurations pour le positionnement de l'unité de régénération.**

### 3 EIP SANS UNITE DE REGENERATION

Dans ce paragraphe, il est supposé que les trois entreprises A, B et C, qui n'ont aucune unité de régénération, décident de constituer un EIP sans unité de régénération, les flux d'eaux utilisées par une entreprise sont envoyés soit à une ou aux deux autres entreprises, soit à l'égout. Cet EIP est illustré sur la figure 2 a.

Ainsi, afin de réaliser cet EIP avec la gestion la plus performante possible, il est essentiel de fixer certaines règles. Les règles choisies sont les suivantes :

- le gain dû à l'EIP sera reparti proportionnellement aux coûts initiaux de chaque entreprise, c'est-à-dire sans EIP.
- le nombre de connexions pour une entreprise sera inférieur ou égal à celui de l'entreprise seule.
- le nombre d'interconnexions entre les entreprises sera limité à un aller et un retour (figure 2a).

**Tableau 2. Description des différents cas d'études**

| Configuration  | Cas | Description des contraintes   |
|--|-----|---|
| Cas de base (sans EIP)   | 1   | Les industries ne sont pas incluses dans un EIP, elles n'ont aucun lien entre elles et n'ont pas d'unité de régénération  |
| EIP sans unité de régénérations                                      | 2   | Le nombre de connexions est restreint au minimum (21) et chaque industrie doit avoir le même gain   |
| EIP avec unités de régénérations individuelles (Intégration directe) | 3   | Le nombre de connexions est restreint au minimum (26) et chaque industrie doit avoir le même gain   |
| EIP avec une unité de régénération commune (Intégration indirecte)   | 4   | L'EIP possède un intercepteur contenant des unités de régénération de types I, II et III avec le nombre de connexions limité à 26 et chaque industrie doit avoir le même gain |

Une étude préliminaire (cas 1) concerne l'optimisation individuelle du réseau d'eau pour chaque entreprise sans tenir compte de l'EIP, conformément aux objectifs F1 (débit d'eau fraîche) et F3 (nombre de connexions). Dans la mesure où les entreprises n'ont pas d'unité de régénération, l'objectif F2 lié à l'eau régénérée n'est pas pris en compte. Les solutions pour ce cas 1 sont indiquées ci après. Le cas 2 représente la formation de l'écoparc suivant les règles préalablement décrites. Les solutions sont présentées dans le tableau 3, où les gains sont calculés à l'aide du cas 1 comme base. En conclusion, le cas 2 qui respecte les règles préalablement citées (même gain de 4,3 % pour chaque entreprise) est la meilleure solution pour l'EIP.

**Tableau 3. Résultats obtenus pour l'EIP sans unité de régénération**

| Cas         | $F_1$<br>T/h | GEC<br>T/H | Gain<br>% |
|-------------|--------------|------------|-----------|
| A cas 1     | 98.3         | 651        | xxx       |
| A cas 2     | 103          | 623        | 4.3       |
| B cas 1     | 54.6         | 362        | xxx       |
| B cas 2     | 45           | 346        | 4.3       |
| C cas 1     | 190          | 1259       | xxx       |
| C cas 2     | 180          | 1204       | 4.3       |
| Total cas 1 | 343          | 2272       | xxx       |
| Total cas 2 | 328          | 2173       | 4.3       |

#### 4 EIP AVEC UNE UNITE DE REGENERATION

Désormais, chacune des trois entreprises de l'EIP décide d'être équipée d'une unité de régénération (cas 3). 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. Les gains sont calculés par rapport au cas 1.

Les gains sont significatifs avec un total de 70 % 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. 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.

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 (cas 4). Le cas 4 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 limité au minimum faisable : 26.

Une étude d'optimisation préliminaire a montré que la meilleure solution globale pour les trois entreprises est de partager l'unité de régénération I. Pour chaque industrie, une perte de 11.7% est ainsi constatée pour cette configuration par rapport au cas où elle est seule avec sa propre unité de traitement. Les différents cas étudiés sont regroupés dans le tableau 2.

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.

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 travail, 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.

#### 5 EAU ET ENERGIE DANS LES ECOPARCS

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. Pour cela, l'exemple préalablement décrit (cf tableau 6) a été complété par des températures pour chaque procédé. Ainsi, chaque procédé possède une contrainte sur la température du flux sortant et, il sera donc associé à chaque procédé un échangeur qui pourra être soit un refroidisseur soit un réchauffeur. Une étude préliminaire a été réalisée afin de définir pour chaque entreprise, le nombre de connexions, le nombre d'échangeurs, la quantité d'eau consommée, ainsi que l'énergie échangée. L'ensemble de ces critères représente l'impact économique mais aussi l'impact environnemental. Les valeurs optimales pour chaque entreprise prise séparément sont consignées dans le tableau 4, il s'agit de repères initiaux pour l'élaboration de l'EIP. 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.

Afin de définir une gestion possible de l'écoparc, plusieurs configurations sont envisagées :

L'écoparc est constitué de 11 échangeurs de chaleur et le gain énergétique en relatif est le même pour chaque entreprise avec :

- soit le débit d'eau consommé par l'écoparc est inférieur à la somme des débits de chaque entreprise (cas E1)
- soit toutes les entreprises ont un gain sur le GEC (cas E2)
- soit toutes les entreprises ont un gain similaire sur le GEC (cas E3)

L'écoparc est constitué de 10 échangeurs et le gain énergétique en relatif est le même pour chaque entreprise avec :

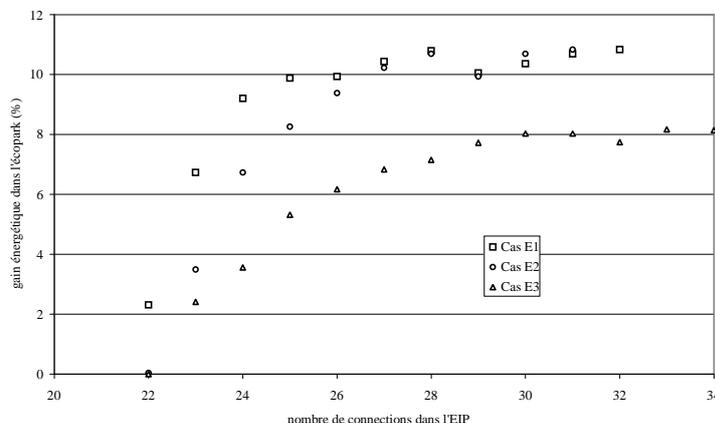
- soit le débit d'eau consommé par l'écoparc est inférieur à la somme des débits de chaque entreprise (cas E4)
- soit toutes les entreprises ont un gain sur le GEC (cas E5)
- soit toutes les entreprises ont un gain similaire sur le GEC (cas E6)

Le cas à 11 échangeurs a été retenu car il correspond à la somme du nombre d'échangeurs pour chaque entreprise (le cas à 10 échangeurs correspond au minimum du nombre d'échangeurs pour l'ensemble de l'EIP). Pour les différents cas, divers scénarii de management peuvent être envisagés.

Les figures 3 et 4 représente l'évolution du gain énergétique pour les 6 cas (E1 à E6) préalablement décrits en fonction du nombre de connexions

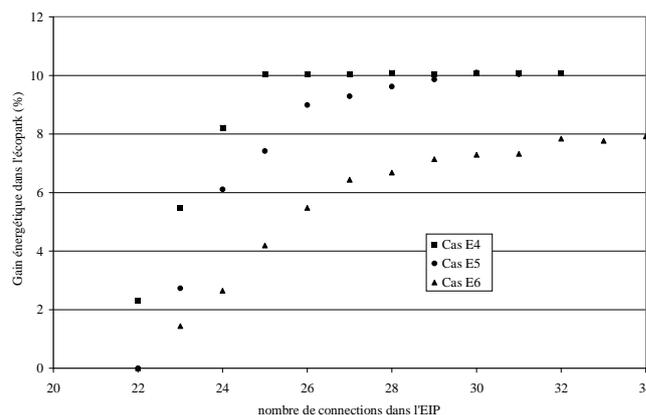
**Tableau 4. Configuration optimale de chaque entreprise**

| Entreprise | Nombre de connexions | Nombre l'échangeurs | ébit d'eau Fraîche (T/h) | Puissance échangée (MW) |
|------------|----------------------|---------------------|--------------------------|-------------------------|
| A          | 7                    | 3                   | 112                      | 741                     |
| B          | 8                    | 3                   | 63                       | 418                     |
| C          | 7                    | 5                   | 195                      | 1292                    |
| A+B+C      | 22                   | 11                  | 370                      | 2451                    |



**Figure 3. Evolution du gain en fonction du nombre de connexions pour 11 échangeurs**

A l'examen des figures 3 et 4, il est délicat de décider le cas qui sera choisi par chacune des entreprises, soit elles pensent que le gain sur l'énergie est primordial avec une réduction des investissements ce qui correspond au cas E4, soit les entreprises travaillent dans un secteur très concurrentiel, elles choisiront le cas E3. 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.



**Figure 4. Evolution du gain en fonction du nombre de connexions pour 10 échangeurs**

Pour tenter d'apporter une réponse, Reniers et al. (2010) ont travaillé sur l'élaboration empirique d'une méthodologie pour l'avancement de collaborations dans l'industrie chimique afin de créer des EIP chimiques.

Ainsi, utilisant les résultats d'un sondage réalisé dans l'un des plus grandes grappes industrielles chimiques, une méthodologie pour aider les décideurs à lancer éventuellement un partenariat a été réalisée. Une distinction a été faite entre une collaboration horizontale (appartenant à la même branche d'activité) et une collaboration verticale (appartenant à la même chaîne de valeur ajoutée). Ainsi, les auteurs suggèrent que la collaboration horizontale devrait être considérée comme une entreprise très complexe dans laquelle les facteurs 'faibles' et indépendants jouent un rôle important, outre les facteurs 'durs' (cf. Tableau 5). La collaboration verticale est pilotée par les facteurs 'durs' seulement. Cette observation peut s'expliquer par le fait qu'une collaboration horizontale n'est pas limitée aux objectifs de collaboration opérationnelle (comme lors du cas de collaboration verticale), mais comprend

une planification stratégique à long terme. De toute évidence, en conséquence, le succès d'une collaboration horizontale (conduisant à des sociétés chimiques durables, Lozano, 2008) est beaucoup plus difficile à atteindre que le succès d'une collaboration verticale (menant à une chaîne d'approvisionnement plus durable, Seuring et Müller, 2008). Au cours de l'élaboration ou l'incitation des parcs éco-industriels, où les entreprises chimiques ont besoin de collaborer entre elles pour réduire l'impact environnemental (Vachon et Klassen, 2006 ; Morose et al., 2010), pour augmenter l'efficacité énergétique (Fichtner et al., 2004) ou adopter des technologies propres novatrices (Corral, 2003 ; Montalvo, 2008), etc.

**Tableau 5. Classification des facteurs selon Reniers et al. (2010)**

|                       |  |
|-----------------------|--|
| Facteurs 'durs'       | <p>Les possibilités financières offertes</p> <p>Le niveau de service offert</p> <p>La position sur le marché</p> <p>Le pouvoir de négociation</p> <p>Les investissements nécessaires pour une collaboration</p> <p>Les résultats de référence concernant les partenaires potentiels</p> <p>La position financière extérieure</p> <p>La connaissance extérieure</p> |
| Facteurs 'faibles'    | <p>La confiance</p> <p>La volonté externe de collaborer</p> <p>L'adéquation culturelle entre les entreprises</p> <p>L'ouverture entre les entreprises</p>  |
| Facteurs indépendants | <p>La flexibilité externe</p> <p>Le niveau de complémentarité</p> <p>Le potentiel d'innovation externe</p> <p>Le soutien des parties prenantes internes et leur engagement</p> <p>Les anciens partenariats</p>   |

## 6 CONCLUSION

L'étude de cet éco parc industriel 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 GEC).
- 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 4.3 % 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.

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.

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 surcoût 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 par essence 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.

## 7 REFERENCES

- Bagajewicz, M., Faria, D.C., (2009) On the appropriate architecture of the water/wastewater allocation problem in process plants. *Computer aided chemical engineering*, 26, pp. 1-20.
- Bagajewicz, M., Savelski, M., (2001a) Algorithmic procedure to design water utilization systems featuring a single contaminant in process plants, *Chemical Engineering Science*, 56, pp. 1897–1911.
- Bagajewicz, M., Savelski, M., (2001b) On the use of linear models for the design of water utilization systems in process plants with a single contaminant, *Chemical engineering research and design*, 79(5), pp. 600-610.
- 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, pp. 1802-1808.
- Brundtland Report (1987) Report of the world Commission on Environment and development, p. 318
- 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. Taiwan Inst. Chem. Eng.* 41, pp. 512-521.
- Chertow, M.R., (2007) “Uncovering” industrial symbiosis. *J. Ind. Ecol.*, 11, pp.11-30.
- Corral, C.M., (2003) Sustainable production and consumption systems collaboration for change: assessing and stimulating the willingness of the firm to adopt/ develop cleaner technologies. The case of the In-Bond industry in northern Mexico, *Journal of Cleaner Production*, 11, pp.411-426
- 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, pp. 307-318.
- Ehrenfeld, J. R., (1997) Industrial Ecology: a framework for product and process design. *Journal of Cleaner Production*, 5(1-2), pp. 87-95.
- El-Halwagi, M.M., 1997. Pollution prevention through process integration—Systematic design tools, Academic Press, CA, USA
- Erkman, S., (2004) Vers une écologie industrielle. Paris : Editions Charles Léopold Mayer, 2ème éd., 251 p.
- Feng, X., Bai, J., Wang, H.M., Zheng, X.S., (2008) Grass-roots design of regeneration recycling water networks. *Comp. Chem. Eng.* 32, pp. 1892-1907.
- Fichtner, W., Frank, M., Rentz, O.,(2004) Inter-firm energy supply concepts: an option for cleaner energy production. *Journal of Cleaner Production*, 12, pp.891-899.
- Lozano, R., (2008) Developing collaborative and sustainable organizations. *Journal of Cleaner Production*, 16, pp.499-509.
- Mavrotas, G., (2009) Effective implementation of the epsilon-constraint method in Multi-Objective Mathematical Programming problems. *Applied Mathematics and Computation*, 213, pp. 455-465.
- Frosch, R.A, Gallopoulos, N.E, (1989) «Strategies for Manufacturing », Scientific American, Vol. 261, Special Issue «Managing Planet Earth », September, p. 144 – 152). Traduction française «Des stratégies industrielles viables », *Pour la Science*, n°145, pp. 106 – 115.
- Kuznets, S. (1955). Economic growth and income inequality. *American Economic Review* 45, pp. 1–28.
- Mirata, M, (2005) Industrial Symbiosis : a tool for sustainable regions. Doctoral Dissertation. The international institute for Industrial Environmental Economics, Lund Sweden, October, 271 p.
- Montalvo, C., (2008) General wisdom concerning the factors affecting the adoption of cleaner technologies: a survey 1990-2007. *Journal of Cleaner Production*, 16(S1), pp.S7-S13.
- Morose, G., Shina, S., Farrell, R., (2010) Supply chain collaboration to achieve toxics use reduction, *Journal of Cleaner Production*. .doi:10.1016/j.jclepro.2010.04.004.
- Olesen, S.G., Polley, G.T., (1996) Dealing with plant geography and piping constraints in water network, *TransIChemE*, 74, pp.273-276
- 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. of Cleaner Production*, 18, pp. 1587-1597.
- Seuring, S., Müller, M., (2008) From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management, *Journal of Cleaner Production* ,16, pp.1699-1710.
- Tibbs H., (1993)Industrial Ecology. An Environmental Agenda for Industry. Global Business Network, Emeryville, CA..
- Vachon, S., Klassen, R.D., (2006) Green project partnership in the supply chain: the case of the package printing industry, *Journal of Cleaner Production*, 14, pp.661-671.
- Vivien, F.D., (2005) Le développement soutenable, Paris, La Découverte, collection Repères,

**Tableau 6. Paramètres de l'EIP traité.**

| <i>Entreprise</i> | <i>Procédé</i> | <i>Charge en<br/>polluant (g/h)</i> | <i>Concentration<br/>maximale d'entrée<br/>(ppm)</i> | <i>Concentration<br/>maximale de<br/>sortie (ppm)</i> | <i>Température de sortie<br/>(°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                                    |