



HAL
open science

VERS UNE SYMBIOSE INDUSTRIELLE DES RESEAUX D'EAU ET D'ENERGIE

Ludovic Montastruc, Marianne Boix, Serge Domenech, Catherine
Azzaro-Pantel, Luc Pibouleau

► **To cite this version:**

Ludovic Montastruc, Marianne Boix, Serge Domenech, Catherine Azzaro-Pantel, Luc Pibouleau.
VERS UNE SYMBIOSE INDUSTRIELLE DES RESEAUX D'EAU ET D'ENERGIE. 9th Inter-
national Conference on Modeling, Optimization & SIMulation, Jun 2012, Bordeaux, France. hal-
00728672

HAL Id: hal-00728672

<https://hal.science/hal-00728672v1>

Submitted on 30 Aug 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

VERS UNE SYMBIOSE INDUSTRIELLE DES RESEAUX D'EAU ET D'ENERGIE

L. MONTASTRUC, M. BOIX, S. DOMENECH

Université de Toulouse
Laboratoire de Génie Chimique
31432 Toulouse Cedex 4- France

C. AZZARO-PANTEL, L. PIBOULEAU

INP-ENSIACET
4 Allée Emile Monso,
Ludovic.Montastruc@ensiacet.fr

RESUME : *Les réseaux d'eaux industrielles sont conçus avec une procédure d'optimisation multicritère, où les débits de l'eau fraîche consommée ainsi que le nombre de connexions des réseaux (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 à l'aide de la méthode ϵ -contrainte. La stratégie MILP est mise en œuvre pour la conception d'un éco parc industriel (EIP) impliquant trois entreprises. Trois scénarios sont considérés : EIP sans unité de régénération de l'eau polluée, EIP où chaque société est propriétaire de son unité de régénération et EIP où les trois entreprises partagent les unités de régénération. Trois unités de régénération possible peuvent être choisies, et la procédure MILP est résolue selon deux types de conditions : nombre limité ou non de connexions, gains relatifs identiques ou différents pour chaque entreprise. Tous ces cas sont comparés selon le coût équivalent exprimé en eau fraîche et en tenant également compte de la complexité du réseau à travers le nombre de connexions. Enfin, on étudie simultanément les réseaux d'eau et de chaleur au sein d'un EIP.*

MOTS-CLES : *Ecoparc, eau, énergie, optimisation, multicritère.*

1 INTRODUCTION

Durant ces dix dernières années, la majorité des pays industrialisés ont largement investi dans la recherche sur l'environnement par suite d'une prise de conscience générale concernant l'appauvrissement des ressources naturelles. Dans le cas 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 et 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. 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 plus de 20 ans (1990).

C'est dans un cadre multicritère que cette étude est menée en minimisant la consommation d'eau fraîche et d'énergie, le nombre de connexions et cela en étudiant des cas où les unités de régénération sont placées différemment. Ce sont ces études qui permettent de proposer une réelle solution pour la mise en œuvre d'un tel parc à l'aide d'une programmation linéaire, bien plus performante en termes de fiabilité et de temps de calcul qu'une approche non linéaire de type MINLP.

2 TRAVAUX ANTERIEURS

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.

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 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. 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). 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.

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. 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.

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.

3 OPTIMISATION D'UN RESEAU D'EAU D'UN PARC ECO-INDUSTRIEL

3.1 Définition du problème

La superstructure générale est illustrée ci-dessous dans le cas de trois entreprises (Figure 1).

Les équations et contraintes sont linéaires tout en respectant les conditions d'optimalité données par Boix et al. (2011). La principale difficulté 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 durées de calculs très réduites, généralement inférieures à la minute, sans aucun problème d'initialisation.

L'exemple considéré ci-après regroupe trois entreprises, chacune composée de cinq unités de procédé 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.

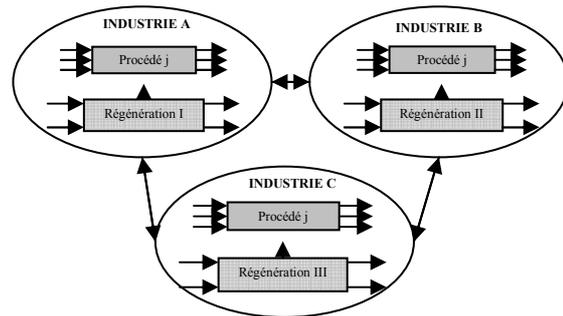


Figure 1. Superstructure d'un EIP (représenté avec 3 industries comportant chacune une unité de régénération).

La superstructure générale d'un réseau est représentée sur la figure 2 : 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.

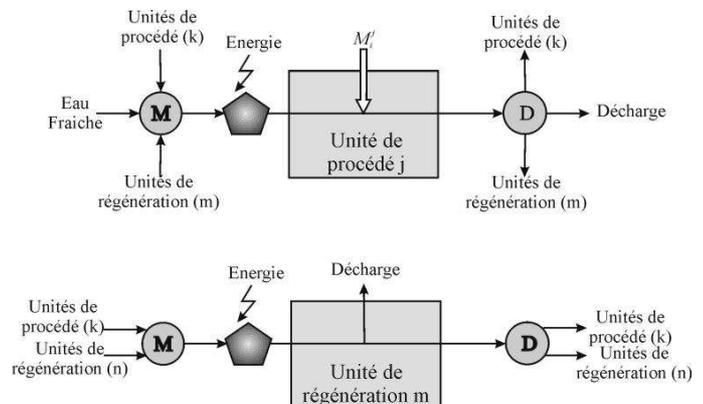


Figure 2. Superstructure générale d'un réseau d'eau et de chaleur

D'une façon générique, la programmation mathématique du problème d'allocation fait intervenir des équations pour les bilans globaux 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 paramètres de chaque procédé sont décrits dans le tableau 1.

Considérons une industrie individuelle composée de cinq unités de procédé, une unité de régénération et huit connexions. 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, la nécessité de prendre en compte le 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].

Procédé	Entreprise	Charge polluant (kg.h ⁻¹)	Cin max (ppm)	Cout max (ppm)	Température (°C)
1	A	2	0	100	40
2		2	50	80	100
3		5	50	100	80
4		30	80	800	60
5		4	400	800	50
6	B	2	0	100	90
7		2	50	80	70
8		5	80	400	50
9		30	100	800	40
10		4	400	1000	100
11	C	2	0	100	80
12		2	25	50	60
13		5	25	125	50
14		30	50	800	90
15		15	100	150	70

Tableau 1. Valeurs des paramètres de chaque procédé

3.2 Stratégie d'optimisation multiobjectif

L'originalité de cette étude consiste à traiter le problème d'EIP à l'aide d'une formulation linéaire. A cela s'ajoute une optimisation selon plusieurs objectifs, car le regroupement d'industries doit forcément passer par ce type de résolution puisque trois critères sont impliqués:

- F_1 : Le débit d'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, qui sera en fait considéré comme contrainte égalité dans le problème biobjectif $\text{Min}[F_1, F_2]$

Il est important de prendre en compte simultanément 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 fournit des fronts de Pareto et donc, des ensembles 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 présente l'avantage d'être beaucoup plus générale 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 consiste à fixer F_3 et à mener des optimisations bicritères $[F_1, F_2]$ selon la méthode ϵ -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, afin de proposer le choix du meilleur compromis:

- Le CEG (coût équivalent global), exprimé par la relation suivante :

$$CEG = F_1 + \alpha \times F_2 + \beta \times F_w$$

Les valeurs de α dépendent du type d'unité de régénération choisie (Tableau 2) et β est estimé à 5.625 (Bagajewicz et Faria, 2009). F_w représente le débit d'eau rejeté à l'égout.

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

Tableau 2. Valeurs du paramètre α en fonction de l'unité de régénération.

- Le NCE (nombre de connexions équivalent) : nous supposons que la distance entre les industries est fixée et identique pour chaque entreprise, le coût des connexions externes entre entreprises est payé à 50% pour chaque entreprise:

$NCE = \text{nombre de connexions internes} + 0.5 \times \text{nombre de connexions externes}$

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.

4. PRESENTATION DE L'EIP ETUDIE

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.
- Les entreprises investissent chacune dans une unité de régénération.
- Une seule unité de régénération commune est utilisée par l'EIP.

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 termes de charge de polluant. Les charges en polluant entrant dans chacune des unités de procédés ainsi que leurs concentrations maximales autorisées en entrée et en sortie sont connues (Boix, 2011). 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 considérer des réseaux n'incluant pas de débits inférieurs à 2 T/h. Selon le tableau 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 choisi.

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 3 afin de faciliter la compréhension du lecteur. Les cas en italiques (*1 et 5*) ne sont pas des EIP, mais représentent les cas servant de base de comparaison dans la suite.

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

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 équivaut à un débit d'eau régénérée nul, ce qui équivaut au cas 1.

Le cas 5 consiste 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 α (Tableau 2) est introduite en tant que contrainte pour permettre au

décideur 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 3). 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.

Configuration	Cas	Description des contraintes
Cas de base (sans EIP)	Cas 1	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
	Cas 5	Les industries n'ont aucun lien avec les autres et ont leur propre unité de régénération
EIP sans unité de régénération	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 relatif
EIP avec unités de régénérations individuelles (Intégration directe)	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 relatif
EIP avec une unité de régénération commune (Intégration indirecte)	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 relatif

Tableau 3. Caractéristiques des configurations et cas étudiés.

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.

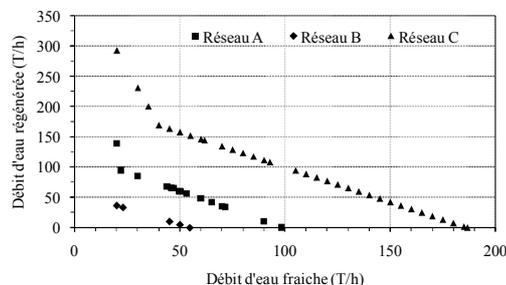


Figure 3. Résultats de l'optimisation bicritère pour les cas 1 et 5.

	Cas 1		Cas 5	
	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
Total	21	2272	26	821

Tableau 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 4. 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.

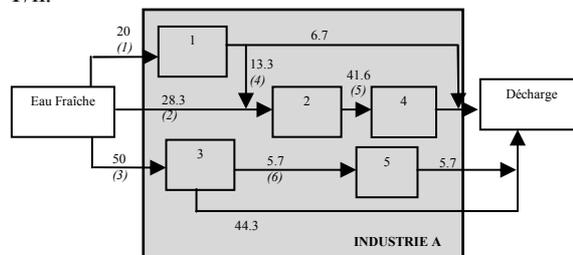


Figure 4. Réseau optimal de l'industrie A pour le cas de base 1 (les débits sont exprimés en T/h et les numéros de connexions sont entre parenthèses).

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

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 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 3).
- **Le cas 4** implique également un nombre de connexion maximal limité à 21 et impose que les bénéfices relatifs (en %) 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.

Les solutions obtenues 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.

D'après le tableau 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.

Industrie	Cas	F_1 (T/h)	F_w (T/h)	CEG (T/h)	NCE	Gain (%)
A	Cas 1	98.3	98.3	651	6	-
	Cas 4	103	92.6	623	6	+4.3
B	Cas 1	54.6	54.6	362	8	-
	Cas 4	45	53.6	346	6	+4.3
C	Cas 1	190	190	1259	7	-
	Cas 4	180	182	1204	9	+4.3
EIP	Total	343	343	2272	21	-
	Total	328	328	2173	21	+4.3

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

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).

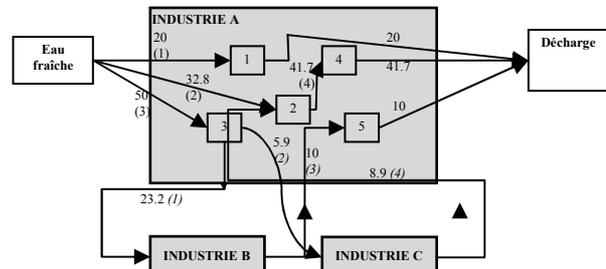


Figure 5. Réseau optimal de l'industrie A dans le cas 4, lorsqu'elle est incluse dans l'EIP (les débits sont exprimés en T/h et les numéros de connexions sont entre parenthèses et normaux pour les connexions internes et en italiques pour les externes).

La figure 5 représente le réseau de l'industrie A incluse dans l'EIP (cas 4). Elle peut être directement comparée à la figure 4, qui illustre le réseau de la même industrie hors regroupement (cas 1). La principale différence provient 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.

4.3. 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 une optimisation effectuée antérieurement, 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 cas 6 et 7 n'ont pas permis d'obtenir un gain positif pour chaque industrie. 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 6. Il consomme 20 T/h d'eau, possède 6 connexions internes, 4 connexions externes (NCE=8) et régénère 166 T/h d'eau.

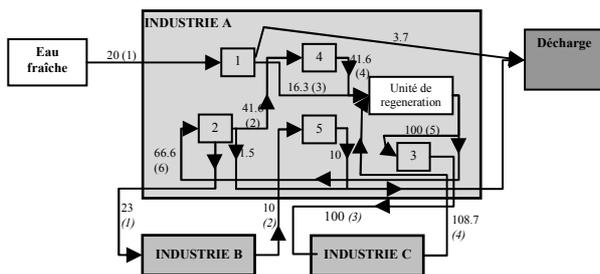


Figure 6. Réseau optimal de l'industrie A dans le cas 8, lorsqu'elle est incluse dans l'EIP.

4.4. 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.

Les configurations étudiées sont les cas 9, 10, 11, 12 et 13.

Les résultats conduisant à un gain positif concernent le cas 13 qui 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. 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). Donc, en augmentant légèrement le nombre de connexions, une solution favorable est obtenue, sans toutefois permettre d'obtenir davantage de bénéfices 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 %.

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. 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.

Des travaux antérieurs (Chew et al., 2010 ; Aviso et al., 2010) 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 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.

La méthode mise en œuvre permet de calculer les solutions en des temps de calcul très faibles, même si les cas étudiés contiennent un grand nombre de variables (Tableau 6). 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.

Problème	Variables continues	Variables entières	Contraintes	Temps de calcul (s)
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 6. Dimensions des cas étudiés et temps de calcul associés.

Enfin, cette étude a permis de concevoir un réseau optimal (figure 7) pour l'EIP possédant plusieurs avantages :

- Chaque industrie profite d'un bénéfice de 13.8% sur la consommation d'eau.
- 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.

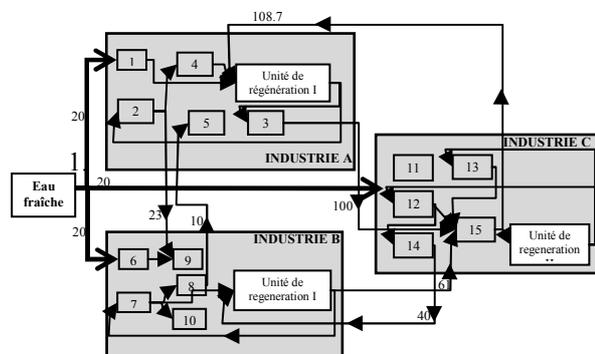


Figure 7. Réseau optimal de l'EIP (cas 8, les débits sont exprimés en T/h).

5 RESEAU D'EAU ET DE CHALEUR AU SEIN D'UN PARC ECO-INDUSTRIEL

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 ses 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. 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.

De plus, le nombre d'échanges entre chaque industrie du parc est également limité à deux par couple d'industrie, comme cela a été admis ci-dessus. 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.

L'exemple préalablement décrit (Boix, 2011) 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 nouveaux paramètres de cet EIP sont décrits dans Boix, 2011.

5.1 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 pour chaque entreprise prise séparément. Il s'agit ici des repères initiaux pour l'élaboration de l'EIP. Pour obtenir ces configurations, une stratégie identique à celle qui a été réalisée 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.

Les résultats montrent que les contraintes des températures engendrent 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 de supprimer un échangeur. Ceci est dû au 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 (Boix, 2011).

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

- Configuration selon laquelle l'éco-parc comporte 11 échangeurs.
- Configuration selon laquelle l'éco-parc comporte 10 échangeurs.

5.2 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 8.

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%.

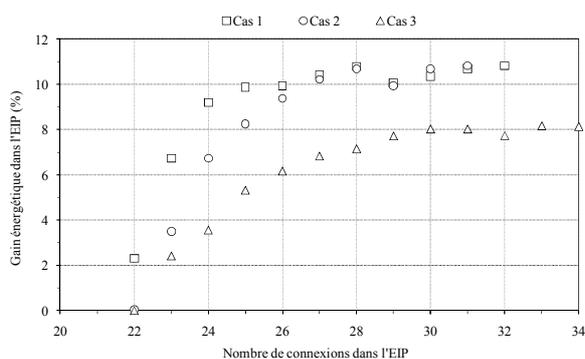


Figure 8. Fronts de Pareto pour chaque cas étudié lorsque l'EIP comporte 11 échangeurs.

5.3 Eco-parc 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 9) :

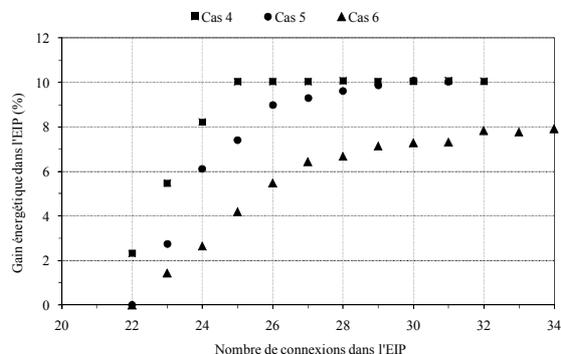


Figure 9. Evolution du gain en fonction du nombre de connexions pour 10 échangeurs

Les courbes ont globalement la même allure que sur la figure 8, 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.

Choisir la configuration optimale de l'EIP final à partir des figures 8 et 9 est un problème délicat. Les entreprises doivent 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.

En supprimant la contrainte sur l'égalité des gains relatifs de chaque entreprise, 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 augmentent 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 10).

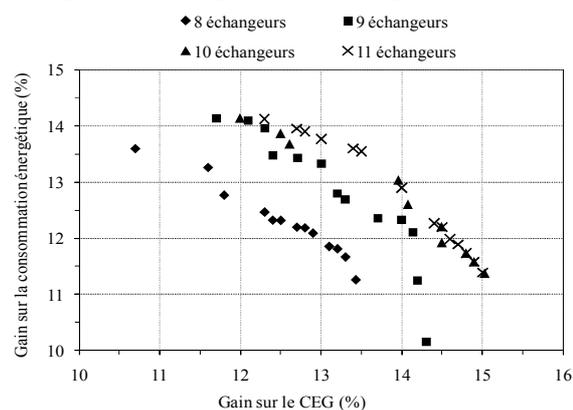


Figure 10. Fronts de Pareto lorsque l'EIP est assimilé à une seule entreprise.

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.

6 CONCLUSION

L'étude réalisée 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. 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 désirent 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, 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.

En imposant une contrainte d'égalité de gain relatif 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 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 une augmentation de 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 puisqu'une diminution de la consommation énergétique et d'eau fraîche est observée.

REFERENCES

Allenby, B., 2006. *The ontologies on industrial ecology? Progress in Industrial Ecology*, An. Int. J. 3, 1-2, 28-40.

- Aviso, K.B., Tan, R.R., Culaba, A.B., Cruz Jr, J.B., 2010. *Bi-level fuzzy optimization approach for water exchange in eco-industrial parks*. Process. Saf. Environ. Prot. 88, 31-40.
- 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.
- Billen, G., Toussaint, F., Peeters, P., Sapir, M., Steenhout, A., Vanderborght, J.P., 1983. *L'écosystème Belgique. Essai d'écologie industrielle*. Centre de recherche et d'information socio-politique CRISP, Bruxelles.
- 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.
- Boix, M., 2011. *Optimisation multicritère de réseaux d'eau* Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, France.
- 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. Taiwan Inst. Chem. Eng. 41, 512-521.
- Chertow, M. R., 2000. *Industrial symbiosis: Literature and taxonomy*. Annu. Rev. Energy Environ. 25, 313-337.
- Chew, I.M.L., Tan, R.R., Ng, D.K.S., Foo, D.C.Y., Majozzi, T., Gouws, J., 2008. *Synthesis of direct and indirect interplant water network*. Ind. Eng. Chem. Res. 47, 9485-9496.
- Chew, I.M.L., Foo, D.C.Y., Tan, R.R., 2010. *Flowrate targeting algorithm for interplant resource conservation network. Part 2: Assisted integration scheme*. Ind. Eng. Chem. Res. 49, 6456-6468.
- Frosh, R.A., Gallopoulos, N.E., 1989. *Strategies for manufacturing*, Sci. Am. 261, 144-152.
- Hall, C.A.S., 1975. *Look what's happening to our Earth. The biosphere, the industriosphere and their interactions*. Bull. Atom. Sci. 31, 11-21.
- Liarska-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.
- 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.
- 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.