



## Conception optimale d'un réseau d'eau et d'énergie pour un parc éco-industriel

BOIX Marianne<sup>a</sup>, MONTASTRUC Ludovic<sup>a\*1</sup>, RAMOS Manuel<sup>a</sup> et DOMENECH Serge<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Laboratoire de Génie Chimique, U.M.R. 5503 CNRS/INP/UPS

Université de Toulouse; 4, Allée Emile Monso ; 31432 Toulouse Cedex 4 – France

Tel : 335 34 32 36 66 – Fax : 335 34 32 37 00

### Résumé

Dans le contexte environnemental actuel, il devient de plus en plus urgent de mettre en œuvre des méthodologies de conception d'industries innovantes. Le concept d'écologie industrielle, et plus particulièrement des parcs éco-industriels, s'inscrit totalement dans cette logique puisqu'il propose à des industries de se rassembler au sein d'un même site afin de partager et d'échanger différents flux (matière, énergie, utilités...) dans le but de diminuer les impacts environnementaux des activités industrielles. Une analyse de la littérature des dernières années a permis de mettre en évidence l'émergence de tous nouveaux travaux concernant l'application des concepts de l'optimisation à la conception de parcs éco-industriels. Ainsi, une modélisation mathématique ainsi qu'une méthode d'optimisation multiobjectif permettent, a priori, de définir quelle est la configuration optimale des échanges inter-entreprises de façon à ce que le parc respecte différents objectifs. Dans cette étude, un cas de regroupement théorique contenant trois entreprises est optimisé dans différentes configurations et une solution optimale est obtenue pour chacune d'entre elles.

Mots-clés : optimisation multiobjectif, eau, énergie, écoparc

### 1. Introduction

Il est désormais communément admis dans la littérature que de nombreux facteurs entraînent un appauvrissement des ressources naturelles tels que par exemple, l'augmentation de la population mondiale ou l'industrialisation croissante. 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 cet appauvrissement des ressources naturelles (UNESCO, 2009). Dans le cas de l'eau douce et/ou de l'énergie, il existe ainsi un réel besoin de diminuer leur consommation en redéfinissant des réseaux 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. 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 « écoparc ». Les réseaux éco-industriels regroupent des réseaux divers allant de

---

\* Auteur/s à qui la correspondance devrait être adressée : ludovic.montastruc@ensiacet.fr

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 (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. Lowe (1997) propose 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. 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.

Depuis ces travaux, de nombreux exemples ont commencé à voir le jour dans la pratique 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). D'autres fructueux exemples, toujours plus nombreux, voient à présent le jour partout dans le monde. La plupart ont vu le jour dans les pays industrialisés d'Amérique du Nord, d'Europe, ou encore en Australie. Plus récemment, c'est dans les pays en cours d'industrialisation que de nombreux parcs naissent. Des pays tels que la Chine, le Brésil ou enfin la Corée sont des témoins de ce développement.

Afin de concevoir des regroupements d'industries plus respectueux de l'environnement, de nombreux outils sont disponibles. Ils peuvent être administratifs, préventifs ou curatifs (terme anglais « end-of-pipe »). L'outil administratif consiste en la mise en place de lois par des décrets politiques de manière à obliger les industriels à respecter des normes de pollution ou des seuils de consommation de ressources ; tandis que l'outil curatif intervient une fois que la pollution est faite. Même si cette dernière solution n'est pas la plus appropriée en terme de préservation de l'environnement, c'est pourtant celle qui est la plus souvent utilisée. L'approche que nous présentons ici fait partie de la troisième catégorie puisqu'elle fait partie des approches préventives, elle permet de concevoir des réseaux d'écoparcs optimaux (transportant de l'eau ou de l'énergie) en termes de pollution et de consommation des ressources en amont de sa construction. Des méthodes d'optimisation sont donc mises en œuvre dans un contexte d'écologie industrielle afin d'optimiser les réseaux des parcs éco-industriels. Une revue bibliographique à ce sujet a été réalisée (Boix et al., 2014) afin de montrer l'importance de

l'application de ces outils mathématiques de Génie des Procédés aux concepts de l'écologie industrielle.

Ainsi, dans le tableau 1, les différents types de coopération au sein d'un écoparc que l'on peut trouver dans la littérature sont décrits ainsi que s'ils sont ou non utilisés dans un contexte d'optimisation mathématique.

La grande majorité des travaux porte sur l'optimisation des échanges d'eau/énergie ainsi que sur le partage d'unités mais aucun article n'a été recensé sur les autres types de coopérations (transformation des déchets, échanges de ressources humaines, transports...) pourtant non négligeables dans ce contexte.

Type de coopération au niveau du procédé	Utilisé dans les approches d'optimisation
Echange de matière, d'eau et/ou énergie	✓
Partage des unités : régénération de l'eau, chaudière	✓
Transformation des déchets en sous-produits	×
Échanges de connaissances, ressources humaines et techniques	×
Transport de marchandises et de personnes	×

Tableau 1. Types de coopérations dans les écoparcs étudiés dans la littérature (Boix et al., 2014)

Enfin, cette étude bibliographique a permis de mettre en évidence l'importance que ce domaine a pris durant les cinq dernières années. La figure 1 montre le nombre de publications parues et citées durant les quinze dernières années en cherchant les mots « optimization » et « eco industrial parks » dans la base de données ISI Web of Science.

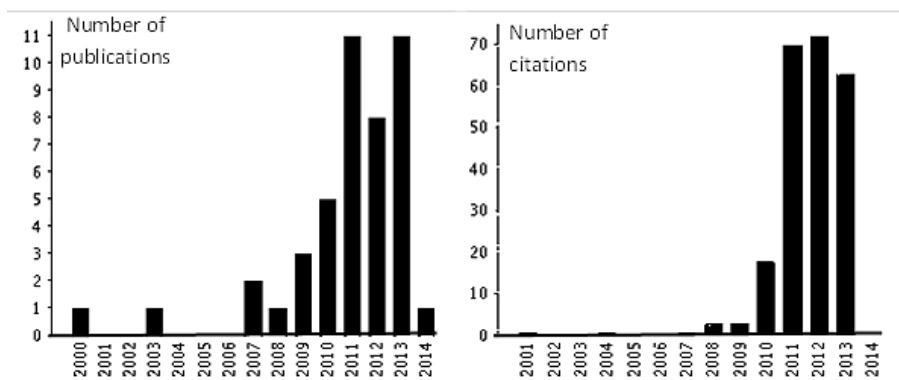


Figure 1. Nombre de références publiées et citées des 15 dernières années contenant les mot-clés « optimization » et « eco industrial park » (Boix et al., 2014).

L'analyse bibliographique met ainsi en évidence l'intérêt grandissant pour les méthodes d'optimisation et les concepts du génie des procédés dans le contexte de l'écologie industrielle. Le but de cette étude est de montrer les effets bénéfiques que peuvent avoir ce type d'approche sur la conception d'un écoparc tant en terme de consommation des ressources en eau et/ou d'énergie que sur un plan purement économique. Dans un premier temps, l'approche méthodologique est exposée en passant en revue les objectifs pouvant être pris en compte ainsi que la notion de superstructure nécessaire à l'élaboration du modèle. Ensuite, les

différentes méthodes d'optimisation multiobjectif sont exposées puis un cas d'étude sur un parc éco-industriel théorique est exposé.

## 2. Approche méthodologique

### 2.1 Objectifs principaux

L'analyse bibliographique effectuée permet d'appréhender et donc d'optimiser un écoparc de plusieurs façons différentes. En effet, il est ainsi possible de considérer l'optimisation des échanges énergétiques inter-entreprises, mais aussi les échanges d'eau et/ou sa réutilisation ou encore les échanges de matière (matières premières, co-produits ou déchets). Le but final étant cependant d'envisager la construction d'un écoparc dans lequel tous ces échanges sont pris en compte. Les méthodes d'optimisation permettent de concevoir le parc, c'est-à-dire de définir ces différents échanges tout en optimisant plusieurs objectifs antagonistes (environnementaux, économiques). Cependant, la formulation mathématique et le choix de ces fonctions objectifs ne sont pas toujours évidents (Erol and Thöming, 2005). Dans cette partie, les indicateurs pouvant servir de fonctions objectifs au problème d'optimisation sont énoncés à partir d'une analyse de la littérature. Bien que souvent plus qualitatifs que quantitatifs, les objectifs sociétaux et de gestion sont décrits dans un premier temps puis ce sont les objectifs économiques, environnementaux et techniques qui seront passés en revue.

La figure 2 expose les différents types d'indicateurs permettant d'évaluer des projets de type écoparc ; ces indicateurs sont issus de IEAT (Industrial Estate Authority of Thailand, 2010) et repris ensuite par Panyathanakun et al. (2013).

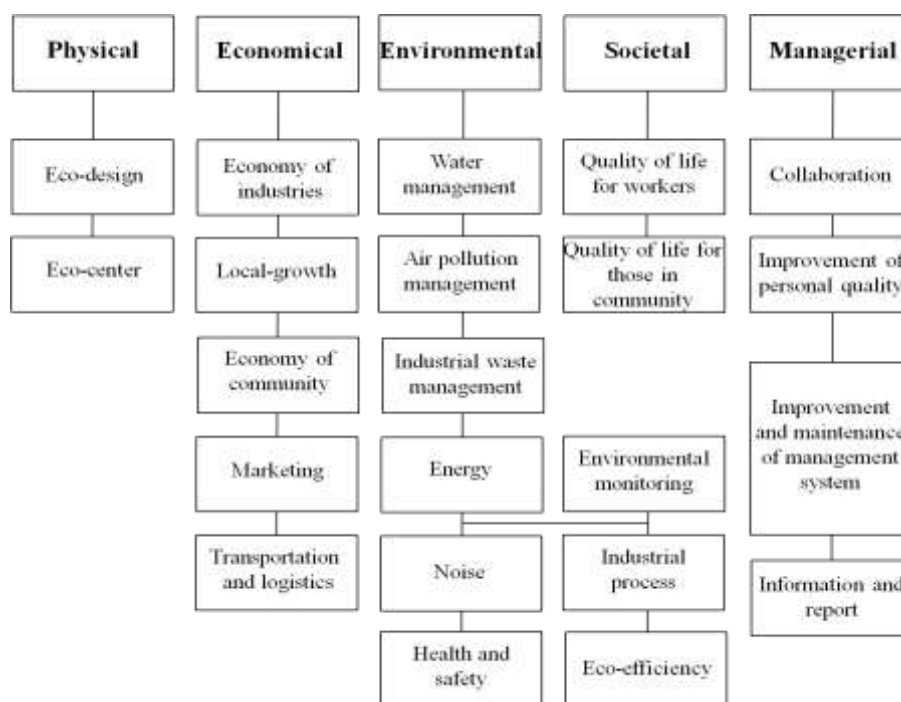


Figure 2. Différents indicateurs nécessaires à l'évaluation des écoparcs (Boix et al., 2014).

- **Aspects sociétaux et de gestion**

Les aspects sociaux sont fondamentaux dans tout développement de projet d'écoparc puisque le social est un des trois piliers du développement durable (Brundtland, 1987). Aviso et al. (2011) a ainsi utilisé en tant que fonction objectif un indicateur de satisfaction de chaque

participant. La fonction objectif prise en compte est alors la maximisation d'un degré de satisfaction  $\lambda$  du participant le moins satisfait (Figure 3).

Plus récemment, Hipolito-Valencia et al. (2014) ont proposé un modèle d'optimisation comportant une fonction sociale. Cet indicateur est fonction du nombre d'emplois généré par la construction et le fonctionnement de l'ecoparc. Enfin, de nombreux autres indicateurs sociaux peuvent être envisagés, bien que difficilement quantifiables, on peut citer par exemple, l'impact sur la santé humaine ou encore l'augmentation du niveau de vie des habitants induit par l'augmentation de l'activité régionale.

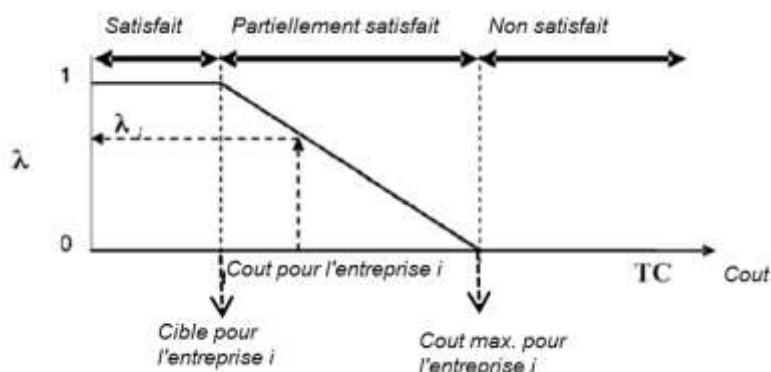


Figure 3. Fonction d'évaluation du degré de satisfaction de chaque participant  $i$  (Aviso et al., 2011).

- **Objectif économique**

Dans la grande majorité des travaux, malgré le caractère multiobjectif de ce type de problème, un seul objectif est le plus souvent optimisé, il s'agit du coût. En effet, un des arguments clé pour qu'un industriel prenne part à ce type de projet est la réduction de son coût, ou l'augmentation de son profit. De plus, cet objectif est facilement quantifiable et rapidement mis en équation sous forme la plupart du temps d'un coût global annualisé. D'autres considérations économiques peuvent également être envisagées : il est possible d'introduire des contraintes dans le problème de sorte que chaque participant ait le même gain relatif à son entrée dans le parc ou encore l'objectif peut être de maximiser le gain par rapport au cas où l'industrie fonctionne seule (Boix et al., 2012).

- **Aspects environnementaux**

La préservation de l'environnement a été un des facteurs déclanchant le développement des ecoparcs. La conception optimale de symbioses industrielles permet une diminution des impacts environnementaux tout en favorisant les activités industrielles en développant des synergies inter-entreprises. Différents indicateurs environnementaux peuvent être évalués et introduits en tant que fonction objectif dans un problème d'optimisation.

Le premier porte sur la minimisation de la consommation des ressources naturelles, que ce soit l'eau, l'énergie ou les matières premières. Cet objectif, relativement simple à formuler est souvent envisagé puisqu'il consiste à minimiser la somme de l'eau fraîche qui alimente un parc (Boix et al., 2012), ou de l'énergie qui alimente le réseau par exemple.

Une deuxième approche consiste à évaluer les impacts environnementaux par le biais d'une analyse de cycle de vie (ACV), ce concept a notamment été étudié par Sokka et al. (2011) ou encore Mattila et al. (2012). Dans ces études, les auteurs démontrent que les émissions de  $\text{CO}_2$  peuvent être drastiquement réduites lorsqu'une entreprise intègre un parc éco-industriel. La quantification des différentes émissions de gaz à effet de serre est réalisée avec une analyse de cycle de vie puis intégrée au modèle d'optimisation dans un deuxième temps afin de trouver une configuration qui mène à une réduction de ces impacts.

Enfin, une approche plus récente à été développée à partir des travaux relatifs à l'empreinte en eau (nom anglais, « water footprint »). Ainsi, Aviso et al. (2011) a intégré ce concept au cas des écoparcs en minimisant l'empreinte en eau de ce type de regroupement afin de préserver les ressources à une échelle plus locale.

- **Objectif topologique**

Lors de la conception d'un écoparc il est également important de prendre en compte l'aspect technique. C'est-à-dire de ne pas négliger la configuration pratique des échanges inter-entreprises. Boix et al. (2012) ont ainsi introduit un nouvel objectif qui consiste à minimiser le nombre de connexions (ou d'échanges) dans le parc afin que le réseau optimal ne soit pas impossible à réaliser dans la pratique.

## 2.2 Modélisation d'un parc éco-industriel, notion de superstructure

L'optimisation d'un écoparc est un type de problème bien particulier dans le domaine de l'optimisation car c'est un problème complexe (de grande taille) qui doit faire face à deux problèmes principaux. Le premier est un problème technico-économique : si les échanges entre les participants sont « infaisables » (c'est-à-dire qu'aucune solution n'est disponible), l'ecoparc ne peut pas être mis en place car une réelle connectivité doit exister entre les entreprises. Le deuxième problème est lié aux aspects organisationnels/commerciaux, puisque le démarrage d'un écoparc doit se faire avec l'accord des participants devant être convaincus de leur intérêt personnel à intégrer un écoparc.

La modélisation d'un parc éco-industriel s'appuie sur la notion de superstructure. Une superstructure est la représentation de toutes les alternatives possibles du parc et l'optimisation permet de déterminer quelles sont les alternatives choisies de façon à respecter les contraintes imposées et à minimiser (ou maximiser) une (ou plusieurs) fonction(s) objectif(s). Cette approche systémique permet une représentation modulaire de la conception des procédés. La figure 4 met en évidence la superstructure d'un écoparc qui contient 3 industries.

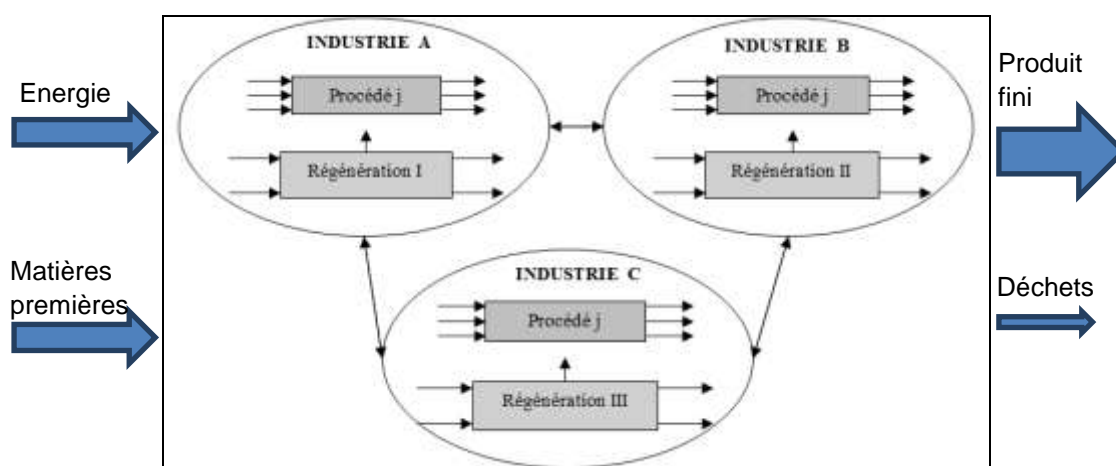


Figure 4. Superstructure d'un écoparc contenant 3 industries

Après avoir élaboré la superstructure, l'étape suivante est la modélisation mathématique qui passe par l'étude des bilans de matières et d'énergie dans le système industriel. Le niveau de détail de la modélisation peut ainsi être adapté selon l'objectif fixé au départ (modélisation des opérations unitaires ou approche de type « boîte noires »). Diverses contraintes peuvent ensuite être ajoutées aux équations de bilans. En fonction de la méthode de résolution choisie, une solution ou plusieurs solutions de conception optimale sont obtenues et permettent de construire le parc.

### 3. Méthodes d'optimisation multiobjectif

#### 2.1 Différents types de méthodologies

Les méthodes de résolution des problèmes d'optimisation multiobjectif sont généralement classifiées selon le nombre de solutions générées ainsi que selon le rôle du décideur au cours de la résolution. Ainsi, on distingue :

- *Les méthodes dites génératives* : ce type d'approche est caractérisé par la génération d'un ensemble de solutions parmi lesquelles le décideur choisit la solution préférée. Dans ces méthodes « a posteriori », sont incluses les méthodes de non-préférence, les méthodes utilisant la scalarisation (méthode des poids et l'approche  $\varepsilon$ -contrainte) et enfin les algorithmes stochastiques (algorithmes génétiques par exemple). Ces méthodes ont la particularité de générer un ensemble de solutions optimales (Front de Pareto) proposant différents compromis entre les critères.
- *Les méthodes de préférence* : dans ce cas, les préférences du décideur sont incluses au cours de la résolution. Ces approches regroupent les méthodes « a priori » comme la programmation par but (Goal Programming) ainsi que les méthodes interactives (NIMBUS par exemple). Puisque ces méthodes insèrent directement les préférences du décideur lors de la résolution, une seule solution est en général retournée.

#### 2.2 Cas de l'optimisation des écoparcs

La caractéristique principale du problème posé par l'optimisation des écoparcs est le fait que la structure (caractérisée par des variables binaires, existence ou non d'une connexion) joue un rôle prépondérant dans la solution. C'est donc un problème qui contient des variables mixtes (entières et continues) de grande taille, c'est donc une formulation MILP (Mixed Integer Linear programming). Ce type de problème est en réalité un grand challenge dans le domaine de l'optimisation puisque les méthodes dites génératives (les plus couramment utilisées) ne sont pas les plus adaptées car elles faillissent à trouver une solution pour les problèmes de grande taille dans lesquels les variables binaires ont un rôle important. De plus, la construction des fronts de Pareto s'avère dans la grande majorité des cas, quasiment impossible. Ainsi, dans cette étude l'approche de programmation par but (GP) est utilisée dans laquelle les préférences sont introduites au cours de la résolution. Une seule solution optimale est finalement retournée.

### 3. Cas d'étude et résultats

#### 3.1 Cas d'étude

Le cas choisi est un cas théorique d'écoparc dans lequel trois industries (cf. Figure 4) décident de se rassembler afin économiser l'usage de leurs ressources (Boix et al., 2012). Soit trois industries, chacune étant caractérisée par un nombre d'opérations unitaires et/ou d'unités de régénération de l'eau ainsi que par des températures de fonctionnement bien définies. Le but est alors de proposer le schéma des connexions (existence ou non et débit circulant) au sein de chaque entreprise et entre chacune d'entre elles. Trois cas différents sont étudiés avec l'approche par goal programming :

- Cas 1 : les trois industries coopèrent mais possèdent chacune leur propre unité de régénération,
- Cas 2 : les trois industries coopèrent et partagent une unité de régénération de l'eau en commun
- Cas 3 : elles possèdent chacune une unité de régénération mais ont également accès à une unité commune pour traiter leur eau.

#### 3.2 Résultats

Le modèle mathématique a été implémenté dans l'environnement GAMS. Les résultats des différents cas sont regroupés dans le tableau 2.

Chacune des trois solutions obtenues représente une configuration optimale pour un cas donné. Il est important de noter que si le cas 1 représente une solution avantageuse pour l'entreprise A (cout moins important que dans les autres configurations), ce n'est absolument pas le cas pour l'entreprise C. Cette dernière, au contraire, serait plus avantagée par le cas 3 qui au contraire désavantagerai l'entreprise 1.

<b>Fonction objectif (MMUSD/an)</b>	<b>Min.</b>	<b>Max.</b>	<b>CAS 1 - Solution du Goal Prog.</b>	<b>CAS 2 - Solution du Goal Prog.</b>	<b>CAS 3 - Solution du Goal Prog.</b>
<b>Cout entreprise A</b>	1.514	6.964	1.854	1.976	2.854
<b>Cout entreprise B</b>	1.144	7.046	1.513	1.316	1.339
<b>Cout entreprise C</b>	2.813	14.134	3.521	2.981	1.960

*Tableau 2. Résultats obtenus pour les différents cas de construction d'écoparc en termes de coût pour chacune des entreprises qui s'insère dans le parc.*

Ce type de dilemme constitue un réel problème pour la conception d'un écoparc. La question est de savoir comment formuler le problème et les différentes contraintes de façon à avoir une solution qui soit satisfaisante par tous. L'une des perspectives à ce travail est ainsi une approche « théorie des jeux » qui permettrait d'atteindre des solutions qui satisfont l'équilibre de Nash. Ce type d'équilibre représente une solution dans laquelle les différentes entreprises du parc font des choix en fonction des stratégies de chacun et cette solution est considérée comme stable car aucune des différentes entreprises ne peut modifier sa stratégie sans modifier sa position. Cette approche est donc particulièrement indiquée dans le cas de la conception d'un écoparc au sein duquel les différentes entreprises veulent tirer leur épingle du jeu sans pour autant dégrader l'aspect environnemental du parc.

## Conclusion

Cette étude a permis de montrer que grâce à une approche venant du Génie des Procédés, il est possible d'obtenir une conception optimale d'un parc éco-industriel. En effet, les outils de modélisation mathématique et d'optimisation multiobjectif permettent ici de définir quelle sera la configuration optimale des échanges inter-entreprises de façon à satisfaire différents objectifs : consommation des ressources (eau fraîche, énergie), critère économique (cout total annualisé) ou encore impacts environnementaux (émission de gaz à effet de serre). Un cas d'étude théorique a démontré la faisabilité de la méthode mise en œuvre en proposant des solutions dans trois configurations différentes. Ces résultats ouvrent de larges perspectives en particulier sur la mise en place de règles permettant l'acceptation de la construction d'un écoparc avec l'ensemble des entreprises partenaires.

## Références

- Allenby, B., 2006, Ann. Int. J. 3 , 28-40.
- Aviso, K.B., Tan, R.R., Culaba, A.B., Cruz Jr, J.B., 2011, J. Clean. Prod. 19, 187-196.
- Boix, M., Montastruc, L., Pibouleau, L., Azzaro-Pantel, C., Domenech, S., 2012, J. Clean. Prod. 22, 85–97.
- Boix M, Montastruc L, Azzaro-Pantel C, Domenech S, 2014, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.09.032.
- Brundtland, G., Khalid, M., Agnelli, S., Al-Athel, S.A., Chidzero, B., Fadika, L.M. et al., 1987, Our common future: the world commission on environment and development. Oxford: Oxford University press.
- Erol, P., Thöming, J., 2005, J. Clean Prod.13, 1492-1503.
- Frosh, R.A., Gallopoulos, N.E., 1989, Sc. Amer. 261, 144e152.



- Hipolito-Valencia, B.J., Lira-Barragan, L.F., Ponce-Ortega, J.M., Serna-Gonzalez, M., El-Halwagi, M.M., 2014, *AIChE J.* 60, 213-236.
- Lowe, E.A., 1997, *J. Clean. Prod.* 5, 57–65.
- Mattila, T., Lehtoranta, S., Sokka, L., Melanen, M., Nissinen, A., 2012, *J. Ind. Ecol.* 16, 51–60.
- Panyathanakun, V., Tantayanon, S., Tingsabhat, C., Charmondusit, K., 2013, *J. Clean. Prod.* 51, 71-79.
- Sokka, L., Pakarinen, S., Melanen, M., 2011, *J. Clean. Prod.* 19, 285–293.
- UNESCO, 2009, *Water in a changing world. The United Nations world water development, Report 3.*