



**HAL**  
open science

# Création d'un modèle inductifs de croissance de clusters industriels à flux optimisés, pour réduire leur impact sur l'environnement

Chao Gu

## ► To cite this version:

Chao Gu. Création d'un modèle inductifs de croissance de clusters industriels à flux optimisés, pour réduire leur impact sur l'environnement. Mathématiques générales [math.GM]. Université du Havre, 2015. Français. NNT : 2015LEHA0013 . tel-01256035

**HAL Id: tel-01256035**

**<https://theses.hal.science/tel-01256035v1>**

Submitted on 14 Jan 2016

**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.



Ecole doctorale 351 SPMII (Sciences Physiques, Mathématiques et de l'Information pour l'Ingénieur)  
Laboratoire des Mathématiques Appliquées du Havre (EA 3821, FR CNRS 3335), Université du Havre  
Laboratoire de Sécurité des Procédés Chimiques (EA 4704), INSA de Rouen

## Thèse

Pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université du Havre  
Discipline : Mathématiques Appliquées

Présentée et soutenue publiquement par

**Chao GU**

Le 8 Octobre 2015

### « Création d'un modèle inductif de croissance de clusters industriels à flux optimisés, pour réduire leur impact sur l'environnement »

Devant le jury composé de :

1. Denis CLODIC, Professeur émérite à MINES Paris Tech - Ecole des mines de Paris, Président d'EReIE (Energy Research Innovation Engineering), Examineur
2. Sébastien LEVENEUR, MCF à l'INSA de Rouen, Examineur
3. Jean-Marc LE LANN, Professeur à l'INP-ENSIACET Toulouse, Directeur de l'ENSIACET, Vice-président scientifique de la Fédération Européenne de génie Chimique (EFCE), Rapporteur
4. Jean-Rodolphe ROCHE, Professeur à l'Université de Lorraine, Rapporteur
5. Lionel ESTEL, Professeur à l'INSA de Rouen, Co-directeur de thèse
6. Adnan YASSINE, Professeur à l'Université du Havre, Directeur de thèse
7. Michel GIMENEZ, CO2 & Industrial Innovation Projects Director, LafargeHolcim, Invité

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

# Remerciements

Cette thèse m'apporte le titre de docteur bien qu'elle m'a aussi permis de m'enrichir personnellement, socialement, intellectuellement et scientifiquement. Je profite de ces quelques lignes pour remercier les personnes qui ont contribué à la réussite de ce travail.

C'est avec beaucoup de reconnaissance que je souhaite remercier mon directeur de thèse, le Professeur **Adnan Yassine**, mon co-directeur de thèse, le Professeur **Lionel Estel**, et mon co-encadrant de thèse, le Docteur **Sébastien Leveneur**, Maître de Conférences HDR. Je les remercie infiniment pour leurs conseils, leurs encouragements et leur confiance. Je les remercie de m'offrir la chance de réaliser mes projets de recherche dans les meilleures conditions et de me donner la possibilité de participer à des séminaires et congrès nationaux et internationaux.

Je remercie la **Chaire CTSC** (Captage, Transport et Stockage de CO<sub>2</sub>) d'avoir financé cette thèse. Je remercie le directeur de la Chaire CTSC, le Professeur **Denis Clodic**, Monsieur **Bernard Gérard**, et tous les membres et doctorants de la Chaire CTSC pour leurs gentillesse et aides précieuses. J'ai apprécié tous les moments de séminaires de la Chaire CTSC passés avec vous.

Je remercie le Professeur **Jean-Marc Le Lann** et le Professeur **Jean-Rodolphe Roche** pour avoir accepté d'être rapporteurs de ma thèse. Je remercie le Docteur **Michel Gimenez** de LafargeHolcim d'avoir accepté de participer à le jury de ma thèse.

Je remercie le Docteur **Anne-Sophie Lemaire** et le Professeur **Alexandre Berred**, grâce à leurs aides j'ai découvert une passion pour l'enseignement et j'ai réalisé mes missions d'enseignement pendant mes deux premières années de thèse et ma première année d'A.T.E.R (attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche).

Je remercie Madame **Emeline Lepetit** pour sa gentillesse tout au long de ces années et ses aides administratives. Je remercie tous les membres de **laboratoire LMAH** de l'**Université du Havre** et tous les membres de **laboratoire LSPC** de l'**INSA de Rouen**. Merci pour ses gentillesse et aides. J'apprécie tous les moments passés dans les laboratoires avec vous.

Je remercie énormément mes parents, Madame **Yanyan Cai** et Monsieur **Xinwei GU**, qui m'ont accompagné dans les moments les plus difficiles. Merci infiniment pour leurs encouragements et leur soutien. Je remercie également Monsieur **Jiexi Zang** pour son soutien.

*Chao*

---

---

---

---

# Tableau des matières

Introduction générale .....	13
Chapitre1. État de l'art de parc éco-industriel.....	15
1.1. Développement durable et écologie industrielle .....	17
1.2. Symbiose industrielle et parc éco-industriel (PEI).....	18
1.3. Exemples des parcs éco-industriels.....	19
1.3.1. Parc Kalundborg, Danemark.....	19
1.3.2. Parc Kwinana, Australie.....	21
1.3.3. Parc Kawasaki, Japon .....	23
1.3.4. Parc Tianji et Parc Guangxi, Chine.....	25
1.3.5. Parc Porto Rico, États-Unis .....	27
1.4. Taxonomie et résumé des parcs éco-industriels .....	29
1.4.1. Type 1 : échanges des déchets à une troisième partie .....	30
1.4.2. Type 2 : échanges des matières principalement dans l'intérieur d'une organisation	30
1.4.3. Type 3 : échanges principes parmi les entreprises colocation dans un parc éco-industriel définie .....	31
1.4.4. Résumé et challenge des parcs éco-industriels .....	32
1.5. Modèles d'optimisation d'écologie industrielle.....	32
1.5.1. Modèles des exemples pour l'écologie industrielle .....	32
1.5.2. Taxonomie et résumé sur les modèles d'optimisation d'écologie industrielle	34
1.6. Outils informatiques pour parcs éco-industriels.....	35
1.6.1. Presteo, Suisse.....	36
1.6.2. IEPT-Industrial Ecology Planning Tool, États-Unis .....	36
1.6.3. e-Symbiosis, Royaume-Uni/Grèce.....	37
1.6.4. IUWAWM of Institute of Eco-Industrial Analysis Waste Manager, Allemane	37
1.6.5. MatchMaker!, États-Unis.....	38
1.6.6. SymbioGIS, Suisse .....	38



---

1.6.7.	RUES- Residual Utilization Expert System, États-Unis.....	38
1.6.8.	DIME-Dynamic Industrial Materials Exchange Tool, États-Unis .....	39
1.6.9.	KBDSS-Knowledge Based Decision Support System, Nouvelle-Zélande/Canada .....	39
1.6.10.	CRISP-Core Resource for Industrial Symbiosis Practitioners, Royaume-Uni	39
1.6.11.	Taxonomie et résumé sur les outils informatiques pour parcs éco-industriels.....	39
Chapitre2.	État de l'art de CSC-Captage et Stockage du Carbone et CCU-Carbone Captage et réUtilisation .....	41
2.1.	Technologie Captage et Stockage du Carbone (CSC).....	43
2.1.1.	Introduction de la technologie Captage et Stockage du Carbone (CSC)	43
2.1.2.	Captage et Compression de la technologie CSC.....	44
2.1.3.	Transport de la technologie CSC .....	45
2.2.	Technologie Carbone Captage et réutilisation (CCU).....	46
2.2.1.	CCU-La culture d'algues .....	46
2.2.1.1.	Introduction de la technologie CCU pour la culture d'algues .....	46
2.2.1.2.	Coûts liés de la technologie CCU pour la culture d'algues .....	48
2.2.2.	CCU-La minéralisation de carbonate.....	48
2.2.2.1.	Introduction de la technologie CCU pour la minéralisation de carbonate	48
2.2.2.2.	Coûts liés de la technologie CCU pour la minéralisation de carbonate	51
2.2.3.	CCU-La bauxite résidu carbonatation.....	52
2.2.3.1.	Introduction de la technologie CCU pour la bauxite résidu carbonatation	52
2.2.3.2.	Coûts liés de la technologie CCU pour la bauxite résidu carbonatation	53
2.2.4.	CCU-La transformation des polymères .....	54
2.2.4.1.	Introduction de la technologie CCU pour la transformation des polymères	54
2.2.4.2.	Coûts liés de la technologie CCU pour la transformation des polymères	55

---

---

2.2.5.	CCU-Le durcissement de béton .....	55
2.2.5.1.	Introduction de la technologie CCU pour le durcissement de béton .	55
2.2.5.2.	Coûts liés de la technologie CCU pour le durcissement de béton.....	56
2.2.6.	CCU-La production de carburant liquide.....	57
2.2.6.1.	Introduction de la technologie CCU pour la production de carburant liquide	57
2.2.6.2.	Coûts liés de la technologie CCU pour la production de carburant liquide	58
2.2.7.	CCU-Le rendement de l'urée stimulé.....	58
2.2.7.1.	Introduction de la technologie CCU pour le rendement d'urée stimulé	58
2.2.7.2.	Coûts liés de la technologie CCU pour le rendement d'urée stimulé	59
2.2.8.	Résumé de la technologie CCU .....	60
Chapitre3.	Résumé de la méthode du Branch-and-Cut.....	63
3.1.	La méthode du Branch-and-Bound .....	65
3.2.	La méthode du Cutting-Plane.....	67
3.3.	La méthode du Branch-and-Cut .....	68
3.3.1.	Algorithme général du Branch-and-Cut.....	68
3.3.2.	Les différences entre la méthode du Branch-and-Bound et la méthode Branch-and-Cut.....	69
3.3.3.	La méthode du Branch-and-Cut dans CPLEX.....	69
Chapitre4.	Modélisation d'un parc éco-industriel, modèle I. ....	71
4.1.	Modélisation du coût de transport du dioxyde de carbone.....	73
4.1.1.	Modélisation du coût de transport du dioxyde de carbone en transporteur routier	73
2.	.....	74
4.1.1.1.	Le coût fixe de transport du dioxyde de carbone en transporteur routier	74
4.1.1.2.	Le coût du carburant consommé durant le transport sans charge en transporteur routier.....	75
4.1.1.3.	Le coût du carburant consommé durant le transport avec charge en transporteur routier.....	75

---

4.1.1.4.	L'expression du coût de transport du dioxyde de carbone en transporteur routier.....	76
4.1.2.	Modélisation du coût de transport du dioxyde de carbone en pipeline.....	77
4.1.2.1.	Modélisation du coût d'investissement et coût d'opération et maintenance d'un pipeline onshore de transport du dioxyde de carbone.....	78
4.1.2.2.	Modélisation du coût capital et coût d'opération et maintenance d'une station pompage .....	78
4.1.3.	Résumé de la modélisation de transport du dioxyde de carbone dans un parc éco-industriel.....	79
4.2.	Coût du Captage CO <sub>2</sub> .....	81
4.2.1.	Les centrales.....	81
4.2.2.	Industries de fer et d'acier.....	82
4.2.3.	Industries de raffineries.....	83
4.2.4.	Industries de ciment .....	85
4.3.	Concept et modélisation d'un parc éco-industriel.....	85
4.3.1.	Conception de industries du type 'source CO <sub>2</sub> ' .....	85
4.3.2.	Conception de industries du type 'client CO <sub>2</sub> '.....	86
4.3.3.	Variables, contraintes et objectif de la modélisation d'optimisation pour les parcs éco-industriels .....	87
4.3.3.1.	Pour les industries du type source CO <sub>2</sub> .....	87
4.3.3.2.	Pour les industries du type client CO <sub>2</sub> .....	88
4.3.3.3.	Pour les échanges entre les industries .....	89
4.3.3.4.	La performance économique d'un parc éco-industriel .....	90
4.3.3.5.	Fonction d'objective du modèle d'optimisation pour un parc éco-industriel	91
4.3.4.	Résumé de la modélisation .....	91
4.4.	Exemple numérique .....	96
4.4.1.	Fiches des données initiales nécessaires .....	97
4.4.2.	La résolution .....	101
4.4.3.	Analyse de la résolution.....	102
Chapitre5.	Modélisation d'un parc éco-industriel général multi-période, modèle II. ....	105
5.1.	Introduction et conception de la modélisation .....	107

---

5.1.1.	Option du remplacement de matériel .....	108
5.1.2.	Option du processus de traitement des sous-produits .....	109
5.1.3.	Option du partage du coût de transport .....	109
5.2.	Analyse et modélisation d'une industrie i .....	110
5.2.1.	Modélisation des flux sortants d'une industrie i .....	110
5.2.1.1.	Conception, hypothèse, paramètres et variables.....	110
5.2.1.2.	Contraintes du bilan massique.....	113
5.2.1.3.	Contraintes du processus de traitement et du stockage .....	115
5.2.2.	Modélisation des flux entrants d'une industrie j .....	117
5.2.2.1.	Conception, hypothèse, paramètres et variables.....	117
5.2.2.2.	Contraintes du bilan massique et du stockage .....	118
5.2.3.	Modélisation du stockage d'une industrie i .....	119
5.2.4.	Modélisation du coût de transport d'une industrie i.....	120
5.2.5.	Modélisation de la performance économique d'une industrie i .....	121
5.3.	Fonction objective et résumé du modèle .....	123
5.4.	Exemple numérique .....	126
5.4.1.	Fiches des données initiales nécessaires .....	127
5.4.2.	La résolution .....	135
5.4.3.	Analyse et amélioration de la résolution .....	138
Chapitre6.	Modélisation d'un parc éco-industriel général multi-période, modèle III. ...	143
6.1.	Introduction et conception de la modélisation .....	145
6.1.1.	Option du remplacement de matériel .....	146
6.1.2.	Option du processus de traitement pour les flux sortants/entrants.....	146
6.1.3.	Option du partage du coût de transport .....	147
6.2.	Analyse et modélisation de l'industrie i .....	147
6.2.1.	Modélisation de la partie « Industrie i » .....	148
6.2.1.1.	Conception, hypothèse, variables et paramètres.....	148
6.2.1.2.	Contraintes du bilan massique.....	150
6.2.1.3.	Contraintes de la performance économique .....	153
6.2.2.	Modélisation de la partie « PE » .....	154

---

---

6.2.2.1.	Contraintes du bilan massique.....	154
6.2.2.2.	Contraintes du contrôle d'un procédé de traitement <i>pe</i> .....	156
6.2.2.3.	Contraintes de la performance économique .....	158
6.2.3.	Modélisation de la partie « PS » .....	159
6.2.3.1.	Contraintes du bilan massique.....	159
6.2.3.2.	Contraintes du contrôle d'un procédé de traitement <i>ps</i> .....	161
6.2.3.3.	Contraintes de la performance économique .....	162
6.2.4.	Modélisation du coût de transport.....	163
6.2.5.	Modélisation de la partie « Stockage » .....	164
6.2.6.	Modélisation de la performance économique d'une industrie .....	165
6.3.	Fonction objective et résumé du modèle.....	168
6.4.	Exemple numérique .....	172
6.4.1.	Données initiales .....	172
6.4.2.	La résolution .....	179
6.4.3.	Analyse de amélioration de la résolution .....	180
	Conclusion.....	185
	Production scientifique .....	189
	Références .....	191
	Figures .....	206
	Tableaux.....	208

---

# Introduction générale

L'écologie industrielle a pour objectif de résoudre les questions liées à l'utilisation des ressources technologiques dans les sociétés, dans le but d'ajouter à la partie des connaissances nécessaires pour commencer à évaluer les problèmes de qualité liés à l'environnement et les questions de disponibilité des ressources. Le concept d'écologie industrielle peut être réalisé et pratiqué à travers d'établissement des parcs éco-industriels. Un parc éco-industriel est une communauté de fabrication et de service des entreprises situées ensemble sur une propriété commune. Les membres cherchent la performance environnementale, économique et sociale accrue grâce à la collaboration dans la gestion des questions environnementales et de ressource.

Les sept parcs éco-industriels symboliques et emblématiques dans le monde ont été étudiés durant la thèse pour obtenir une vision pratique de la problématique et pour acquérir les informations du développement des éco-parcs de la réalité, et il s'agit du parc Kalundborg en Danemark, le parc Kwinana en Australie, le parc Kawasaki en Japon, les parcs Tianji et Guangxi en Chine, et les parcs Barceloneta et Guayama de Porto Rico en Etats-Unis. Les outils informatiques représentatifs pour l'analyse de parcs éco-industriels sont également étudiés, ce sont les outils Presteo, IEPT, e-Symbiosis, IUWAWM, MatchMaker !, SymbioGIS, RUES, DIME, KBDSS et CRISP. Des modèles d'optimisation de l'écologie industrielle ont été développés et appliqués. Ils sont également étudiés.

Les technologies CSC et CCU ont été étudiées, ainsi que les différentes options de CCU. Les coûts de captage de dioxyde de carbone au sein de l'industrie de différents types et les coûts d'application de la technologie CCU sont présentés. Le transport du dioxyde de carbone par le réseau routier et par pipeline est résumé et modélisé.

L'objectif principal de la thèse est de créer des modèles mathématiques d'optimisation pour maximiser des flux des échanges dans un parc éco-industriel et pour réduire les impacts négatifs des industries sur l'environnement. Des modélisations de type « modèle I », « modèle II » et « modèle III » sont proposées.

Dans le modèle I, une industrie peut être considérée soit comme une industrie de type fournisseur soit comme une industrie de type client dans un parc éco-industriel (PEI) à développer. Dans ce modèle, la partie de stockage n'est pas prise en considération et elle n'est pas incluse dans la modélisation. Les industries de type client peuvent avoir les options de réceptions fixes et flexibles. L'option de réception fixe représente la quantité de la demande d'un matériel fixé et doit être satisfait obligatoirement. L'option de réception flexible représente la quantité de la demande d'un matériel non fixé et peut s'adapter aux situations de fourniture réelle à l'intérieur du PEI étudié. Le modèle I est statique par rapport au temps.

Dans le modèle II, une industrie peut être considérée en tant qu'industrie de type fournisseur et de type client. Les difficultés pour l'établissement et le développement d'un parc éco-industriel sont principalement l'identification des flux de matière ou

---

d'énergie et la performance économique des industries. De plus, il semble improbable que les flux d'échange puissent satisfaire complètement les besoins des industries bénéficiaires dans la réalité. Donc, les options de remplacement de matériel, de processus de traitement et de partage de coût de transport étaient prises en compte et ajoutées dans la modélisation. Le modèle II est dynamique au niveau du temps et les paramètres peuvent évoluer et peuvent être modifiés avec le temps pour s'approcher de la réalité. Par hypothèse, seules les industries fournisseurs peuvent avoir les possibilités des traitements des matériaux. Ceci signifie qu'après réception d'un flux de matériel, les industries clients ne peuvent les utiliser que directement.

La conception de modèle III est basée sur celle de modèle II. Une industrie peut être considérée en tant qu'industrie fournisseur et industrie client. Les options de remplacement de matériel, de processus de traitement et de partage de coût de transport ont été ajoutées dans la modélisation. Le modèle III est dynamique au niveau de temps et la possibilité d'auto-recyclage est prise en compte dans cette nouvelle modélisation. Les paramètres peuvent être flexibles durant les différentes périodes. Par exemple, le prix unitaire de vente d'un matériel peut varier d'un trimestre à un autre.

Les modèles sont des programmes linéaires mixtes de type MILP « Mixed Integer Linear Programming ». Le traitement des données initiales a été réalisé sous l'environnement de Matlab Version 7.8.0 R2009a. Les données traitées sont transformées en format compatible avec l'environnement de GAMS Version Win32 23.8.2 pour pouvoir les mettre sous forme d'un modèle linéaire mixte. La solution optimale de ce modèle linéaire mixte est déterminée en utilisant le solveur IBM ILOG CPLEX Version 12.4.0.0. CPLEX utilise un algorithme de Branch-and-Cut qui résout une série de sous-problèmes de programmation linéaire. Les simulations sont effectuées sur un PC DELL équipé d'un processeur de type : Intel(R) Core(TM) 2 Duo CPU, P7450, 2,13GHz. Les résultats numériques de chaque modèle sont présentés.

---

# **Chapitre1. État de l'art de parc éco-industriel**



---

---

---

---

## 1.1. Développement durable et écologie industrielle

Selon la Commission Brundtland [1], la définition du terme «développement durable» a été déclarée comme «un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à satisfaire leurs propres besoins».

Le concept de l'écologie industrielle offre une perspective de systèmes utiles pour soutenir le développement durable tout en assurant la création de valeur pour les actionnaires. Sporadiquement évoquée dès les années cinquante par certains sociologues, cette approche globale de la société industrielle et de sa place dans la biosphère va réellement prendre corps avec la naissance du concept de développement durable au début des années 1990. Elle met, en effet, en évidence des leviers permettant d'évoluer vers cet objectif. Nous pouvons dire que, l'écologie industrielle est une réponse de l'industrie pour le développement durable

L'écologie industrielle n'a toutefois été véritablement reconnue et institutionnalisée qu'à la suite d'un colloque, organisé par la « National Academy of Sciences », sur le sujet en 1991 et la publication, dès 1997, d'une revue spécialisée intitulée «The Journal of Industrial Ecology ». La « National Academy of Sciences » est une association privée à but non lucratif.

La notion d'écologie industrielle a été développée en 1989 par R. Frosh et N. Gallipolis [2] de General Motors Research Laboratories dans un article fondamental et remarquable, dans lequel ces auteurs suggèrent que le modèle industriel pourrait être plus efficace si les flux de matières sont modélisés d'après les écosystèmes naturels. R. Frosh a fait une deuxième contribution dans un autre article, dans lequel il a affirmé que le concepteur du produit joue un rôle important [3].

D'une manière générale, l'écologie industrielle est engagée à résoudre les questions liées à l'utilisation des ressources technologiques dans les sociétés, dans le but d'ajouter à la partie des connaissances nécessaires pour commencer à évaluer les problèmes de qualité liés à l'environnement et les questions de disponibilité des ressources.

D'après Ernest A. Lowe et Laurance K. Evans [4], l'écologie industrielle implique plusieurs principes distinctifs:

- Toutes les activités industrielles (fabrication privé et public, des services et infrastructures) sont des systèmes naturels qui doivent fonctionner en tant que telle dans les limites de leurs écosystèmes locaux et la biosphère.
- La dynamique et les principes des écosystèmes offrent une puissante source de l'orientation dans la conception et la gestion des systèmes industriels.
- La réalisation d'efficacité haute d'énergie et de matériaux dans la production, l'utilisation, le recyclage et le service va générer un avantage concurrentiel et des avantages économiques.

- 
- La source ultime du développement économique est la viabilité à long terme de la planète et ses écosystèmes locaux, sans lesquels la réussite actuelle des entreprises ne présente pas de sens.

De fait, il n'existe pas de définition standard de l'écologie industrielle. Cependant, Erkman [5] et plusieurs auteurs s'accordent à retenir trois éléments clés:

- Il faut avoir une vue intégrée globale systémique, de toutes les composantes de l'économie industrielle et de leurs relations avec la biosphère.
- Il faut mettre l'accent sur le substrat biophysique des activités humaines, à savoir les motifs complexes de flux de matières à l'intérieur et à l'extérieur du système industriel, en contraste avec les approches actuelles qui considèrent surtout l'économie en termes d'unités monétaires abstraites, ou encore les flux d'énergie.
- Il faut considérer la dynamique technologique, à savoir l'évolution à long terme (trajectoires technologiques) des grappes de technologies clés comme un élément crucial (mais non exclusive) pour la transition du système industriel viable réelle à un écosystème industriel viable.

## **1.2. Symbiose industrielle et parc éco-industriel (PEI)**

La symbiose industrielle est un sous-ensemble de l'écologie industrielle, qui met particulièrement l'accent sur l'échange de flux de matière et d'énergie [6].

Agarwal A. et P. Strachan [7] ont déclaré: "La symbiose industrielle peut être définie comme le partage des services, des utilités, et des sous-produits des ressources entre les divers acteurs industriels afin d'ajouter de la valeur, de réduire les coûts et améliorer l'environnement."

Un parc éco-industriel (PEI) est un type spécial de parc industriel. Dans un PEI, la tentative des entreprises de coopérer avec les autres est de réduire les déchets et la pollution, de partager efficacement les ressources, par exemple, les matériaux, l'énergie, l'eau et ainsi de suite. Il contribue également à la réalisation du développement durable, dans le but d'accroître les gains économiques et d'améliorer la qualité de l'environnement.

Le Manuel Parc Eco-industrielle [8] précise que "un parc éco-industriel est une communauté de fabrication et de service des entreprises situées ensemble sur une propriété commune. Les membres cherchent la performance environnementale, économique et sociale accrue grâce à la collaboration dans la gestion des questions environnementales et de ressources".

De nombreux objectifs différents peuvent être identifiés pour l'application d'une approche écologique à la conception et l'exploitation de parcs industriels [9]. Parmi les plus pertinents, il faut inclure:

- 
- la conservation des ressources naturelles,
  - la réduction des coûts de production, des matériaux, d'énergie, d'assurance et de traitement et la réduction des passifs,
  - la meilleure efficacité d'exploitation, les améliorations de la qualité, de la santé de la population et de l'image publique,
  - le revenu potentiel grâce à la vente de matériaux de déchets.

Comme on peut le voir à partir de cette liste d'objectifs, nous pouvons remarquer qu'une approche écologique est synonyme d'une approche économique.

Les risques potentiels de la mise en œuvre d'une stratégie d'échange de ressources dans un PEI [10] sont principalement :

- Un PEI ne peut généralement pas être éternellement stable. Entreprises utilisent les uns des autres produits résiduels comme entrées. Par conséquent, si une usine ferme ou change sa gamme de produits, un PEI devra faire face à la nécessité de l'évolution.
- Les renseignements exclusifs pourraient devenir disponibles pour les concurrents. Ainsi, la construction d'un PEI a besoin d'un moyen sécurisé pour échanger des informations entre les industries.

### **1.3. Exemples des parcs éco-industriels**

#### **1.3.1. Parc Kalundborg, Danemark**

L'exemple le plus célèbre et la plus ancienne de la symbiose industrielle est le parc éco-industriel de Kalundborg au Danemark [11]. Ce projet a émergé dans les années 1970. Sa représentation schématique est illustrée à la Figure 1.

Le développement de la symbiose industrielle à Kalundborg a été décrit comme un processus évolutif dans lequel un certain nombre d'échanges de sous-produits indépendants ont progressivement évolué en un réseau complexe d'interactions symbiotiques entre les sociétés locales et la municipalité [10] [12].

Une caractéristique essentielle du Kalundborg est que le matériel et les échanges d'information sont pris en charge par des liens émotionnels forts qui unissent les gestionnaires et le personnel des différentes entreprises situées dans la zone.

Selon les informations locales, les échanges de projets sont distingués en deux catalogues: échanges à court terme et échanges à long terme. En générale, les projets à court terme sont durant trois mois et les projets à long terme sont durant au moins dix ans. Les projets sont bilatéraux.

Il n'y a pas de stratégies d'optimisation globale à Kalundborg. Les industries cherchent eux-mêmes leurs partenaires.

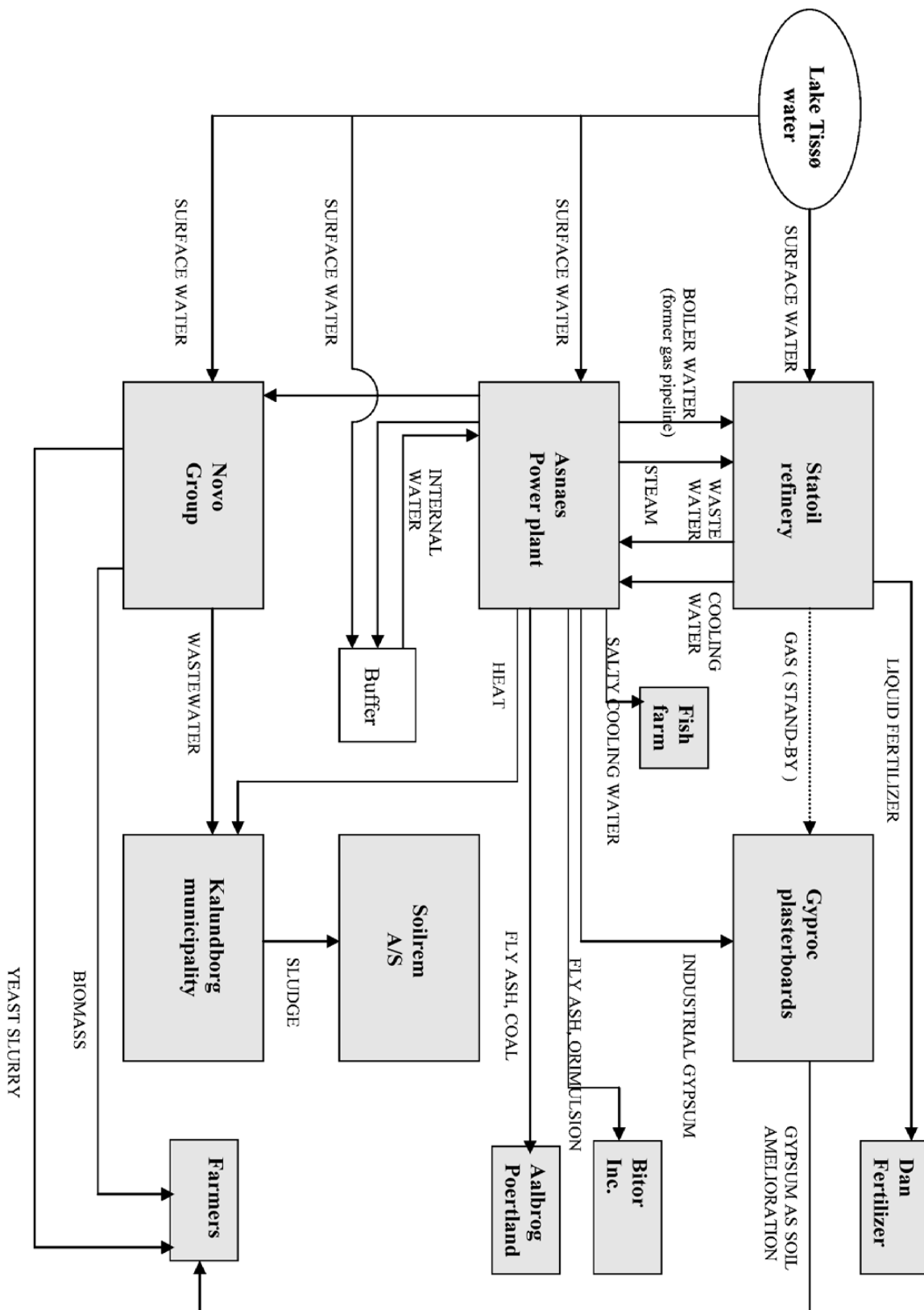


Figure 1. Parc éco-industriel de Kalundborg en 2002 [12].

---

### 1.3.2. Parc Kwinana, Australie

Le projet de synergies industrielles dans Kwinana a émergé dans les années 90 par la création du conseil des industries de Kwinana afin de favoriser les interactions positives entre les industries locales, le gouvernement et la communauté [13].

La carte de la symbiose du parc Kwinana de l'année 2007 est présentée dans la Figure 2.

Nous pouvons citer l'exemple de réutilisation du dioxyde de carbone dans ce parc éco-industriel. L'alumine de la raffinerie d'Alcoa utilise du dioxyde de carbone capturé à partir d'une usine d'ammoniac pour réduire l'alcalinité des résides de bauxite.

Il faut aussi souligner la réutilisation de gypse de l'usine chimique pour l'amendement des sols, la réutilisation de chaux poussière des fours de cimenterie pour la désulfuration, la réutilisation de fumée de silice à partir de l'alumine fondue et producteur de la zircone, la réutilisation de l'acide chlorhydrique et la réutilisation des cendres volantes [14] [15].

Concernant les sélections des partenaires, les critères de sélection comprennent les volumes potentiels de matériaux réutilisables, l'entreprise et la durabilité des échanges, et le travail déjà accompli par les industries individuelles [14]. Cela signifie que des synergies seraient décidées indépendamment par chaque industrie, et donc, nous pouvons souligner qu'il n'y a pas de stratégies d'optimisation globale à Kwinana.

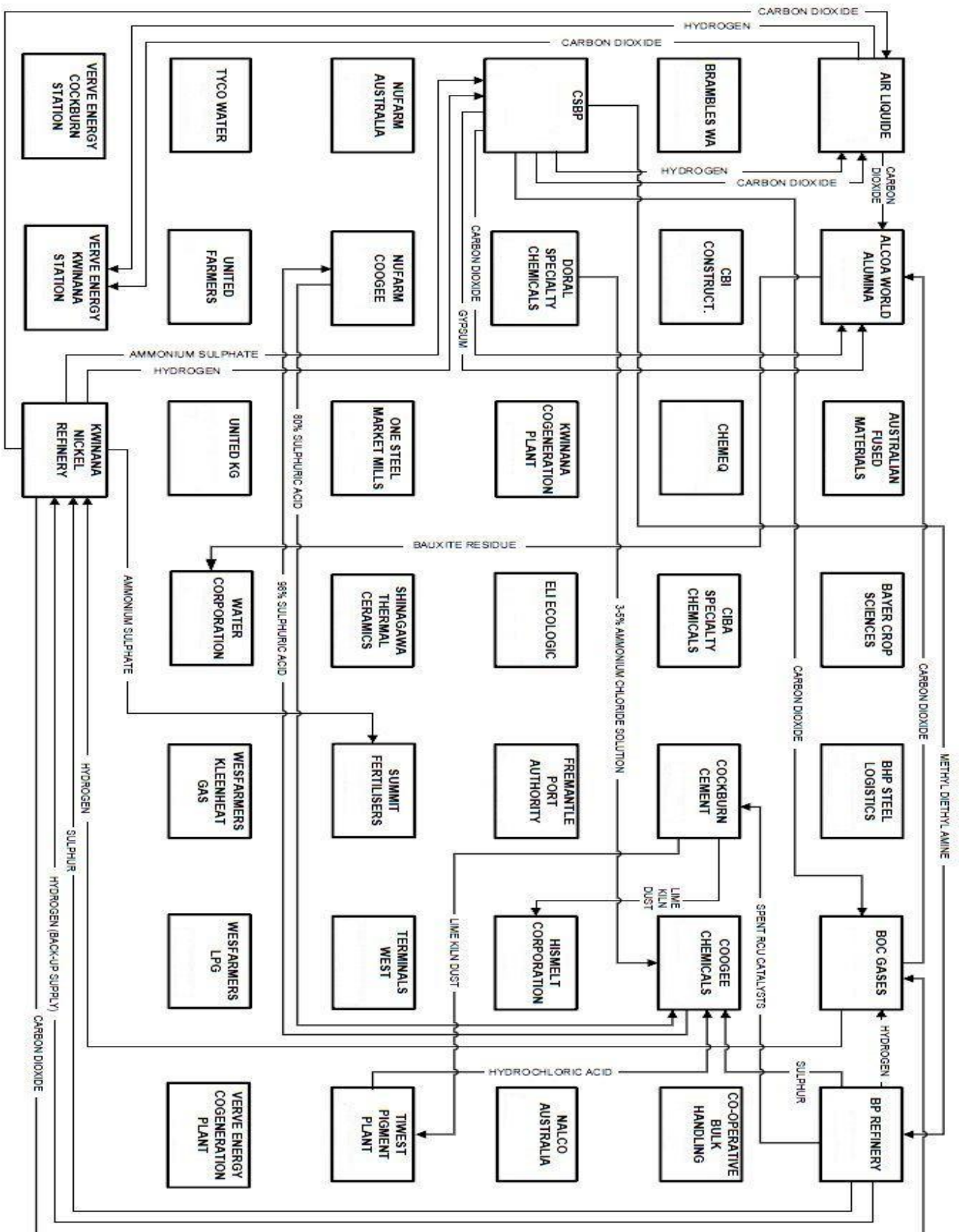


Figure 2. Parc éco-industriel de Kwinana, Australie en 2007 [16].

---

### 1.3.3. Parc Kawasaki, Japon

Ce projet de Kawasaki a été lancé depuis 1997. Le niveau de symbiose actuelle de Kawasaki est représenté sur la Figure 3. Les données de Kawasaki ne sont pas toutes révélées en raison de secrets industriels. Bien que ces données soient incomplètes, au moins 56 500 tonnes de déchets des sites d'enfouissement ou d'autres formes de gestion des déchets ont été assurées d'être valorisées par des échanges dans le parc éco-industriel de Kawasaki [17]. En vertu d'un projet national japonais, le programme Eco-Town, deux clés de succès du projet Kawasaki sont ses investissements dans les installations de recyclage et la diversification des industries existantes.

Cinq installations de recyclage ont été établies sur des sites de l'industrie des matériaux en vue de l'introduction d'entreprises qui ont des technologies respectueuses de l'environnement. Les cinq installations comprennent des systèmes de recyclage : deux déchets consommant des déchets plastiques en tant que contribution aux haut-fourneaux pour la production d'ammoniac, une installation de recyclage de papier, un centre de recyclage du PET-à-PET, et un centre de transfert des déchets plastiques dans des cadres de prise du béton [18].

Les stratégies de diversification dans les industries japonaises ont favorisé et encouragé les développements symbiotiques à Kawasaki, par exemple les aciéries et les cimenteries [17].

Précisément, DC Ciment industrie l'a fait avec son programme actif pour une utilisation de carburants de remplacement, comme les plastiques mélangés spécifiquement, déchets organiques, et la suie, BF laitier est utilisé comme substitut de clinker, et d'autres matières premières comme les boues et les sols construction. Le groupe JFE s'est diversifié dans son cœur de métier, par exemple l'utilisation de matières plastiques en tant qu'alternative BF réducteur.



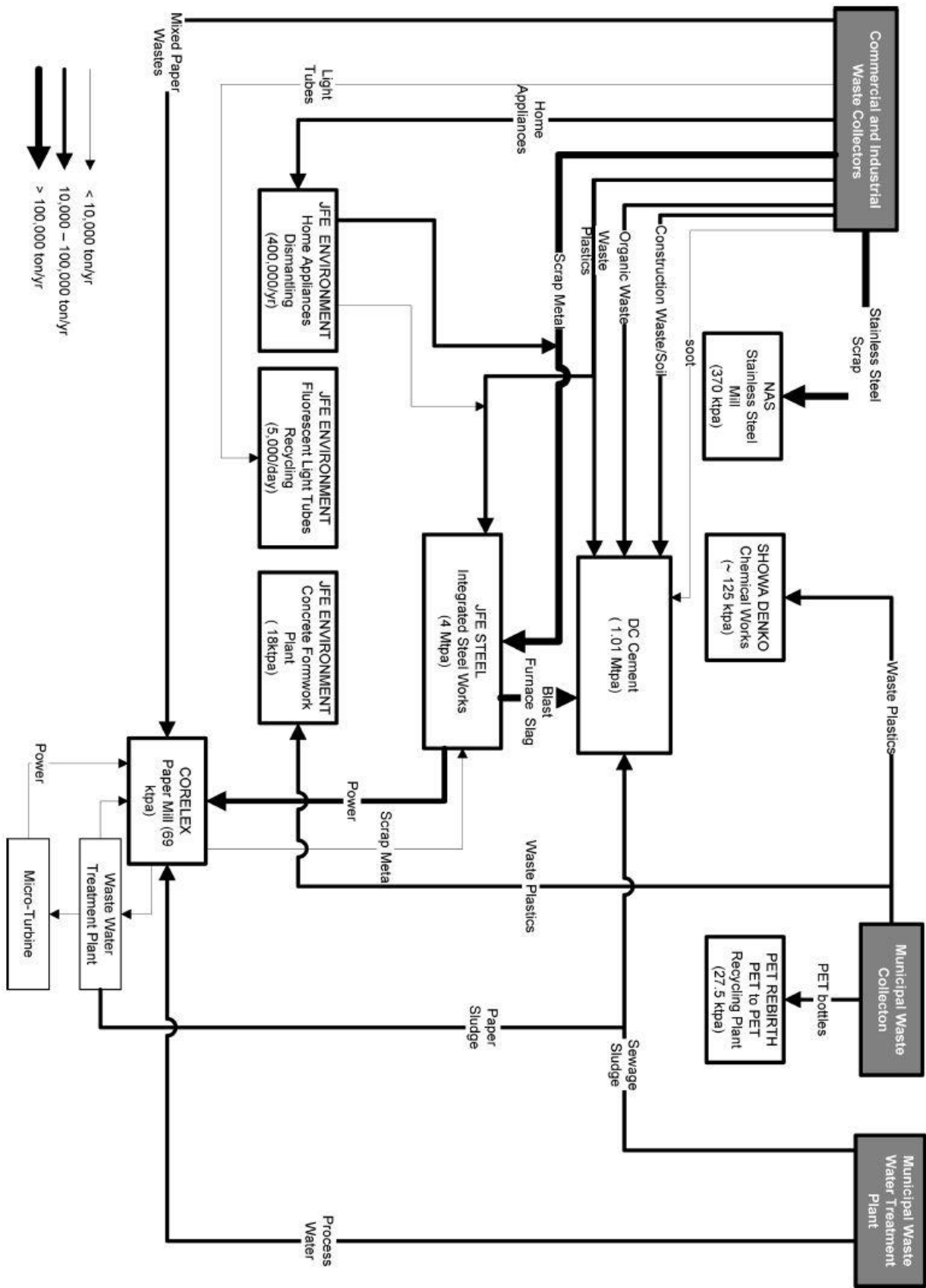


Figure 3. Parc éco-industriel de Kawasaki, Japon en 2009 [17].

---

#### 1.3.4. Parc Tianji et Parc Guangxi, Chine

Le projet de démonstration de symbiose industrielle dans la zone de développement économique et technologique de Tianjin (TEDA) en Chine a été lancé depuis 2001 [19] et les échanges symbiotiques sont montrés sur la Figure 4.

Environ 45,5% des déchets industriels solides sont réutilisés [20]. Afin de favoriser les échanges de sous-produits, Tianjin Economic-technological Development Area a prévu depuis 2007 d'établir un site de partage de l'information visant à permettre aux industries d'envoyer leur quantité et la qualité des déchets à ce site. Egalement, chaque entreprise a accès à de telles informations, mais sans informations détaillées sur les fournisseurs de déchets.

Guitang Groupe situé à Guangxi est un exemple remarquable de symbiose industrielle en Chine. Depuis 1998, Guitang Groupe a recueilli la boue après avoir été séché, et a commencé à l'utiliser comme matière première pour la production de ciment [21].

Le projet de symbiose industrielle de Guitang a été officiellement approuvé depuis 2001. La carte de la symbiose du parc Guitang est montrée sur la Figure 5 [22].

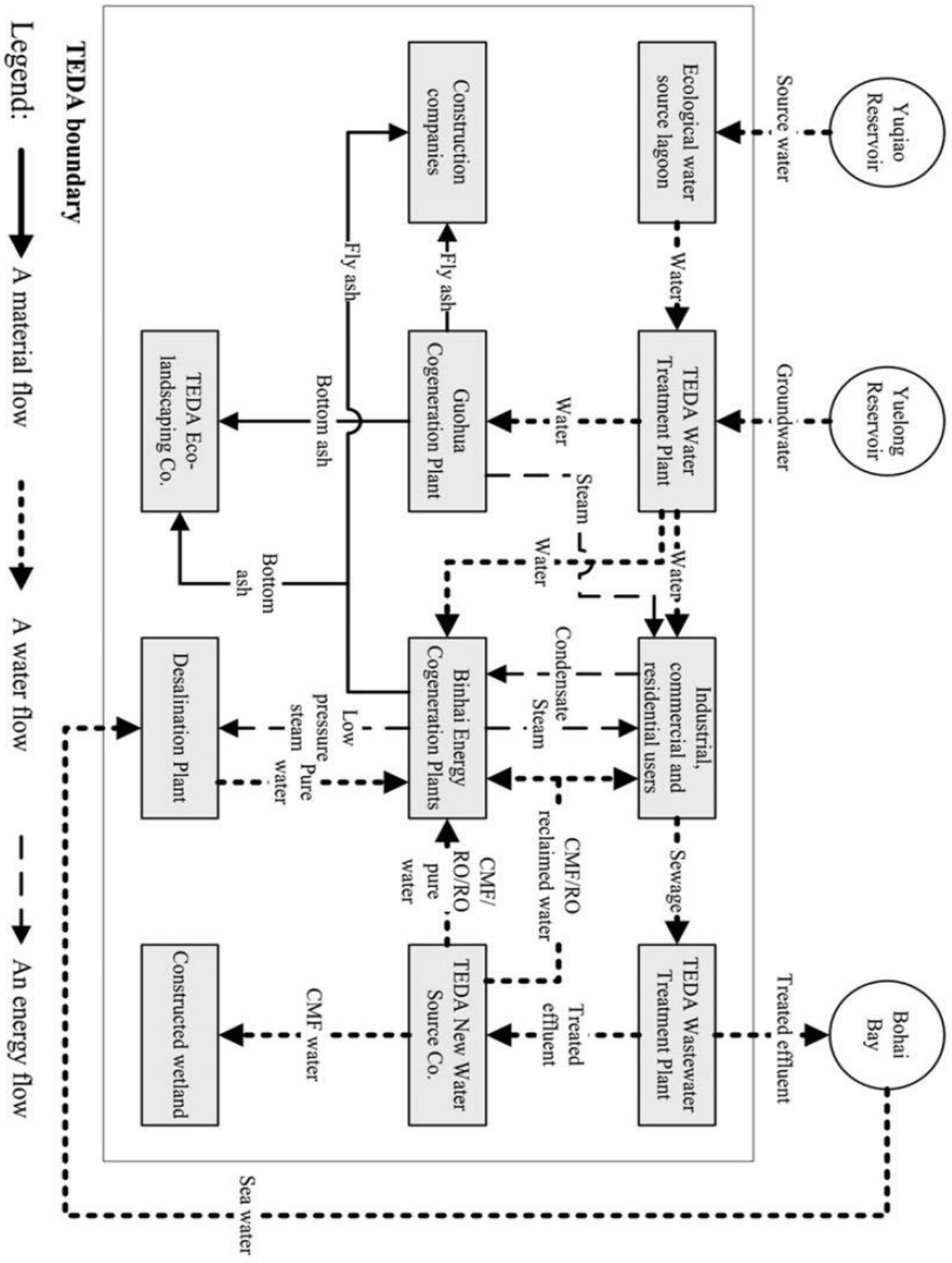


Figure 4. Parc éco-industriel de Tianji, Chine, en 2007 [19].

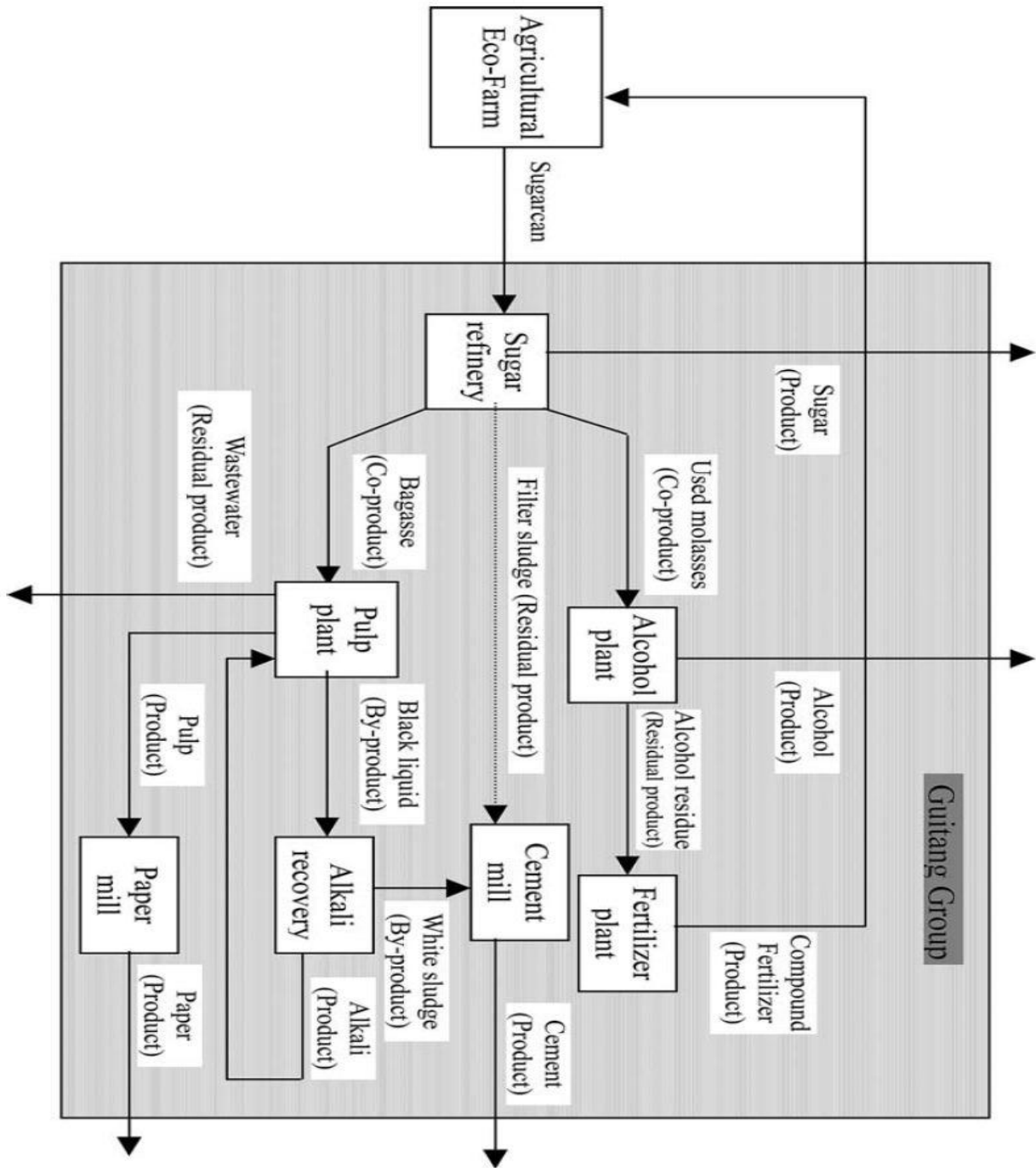


Figure 5. Parc éco-industriel de Guangxi, Chine, en 2004 [21].

### 1.3.5. Parc Porto Rico, États-Unis

Porto Rico, pour les cinquante dernières années, son industrialisation est intense. Yale Industrial Ecology Center a commencé un examen des systèmes industriels écologique de Porto Rico en l'année 2001 [23]. Deux exemples de parcs

éco-industriels de Porto Rico, Barceloneta et Guayama, sont illustrés sur la Figure 6 et Figure 7.

Les données détaillées et les conceptions de ces parcs éco-industriels ont été étudiées [24] [25]. Barceloneta est de type «une seule industrie dominée avec symbiose significative». Guayama est de type «une industrie mélangé avec symbiose significative». Nous pouvons conclure que la symbiose de Barceloneta est plus centralisée, et la symbiose de Guayama est plus équilibrée.

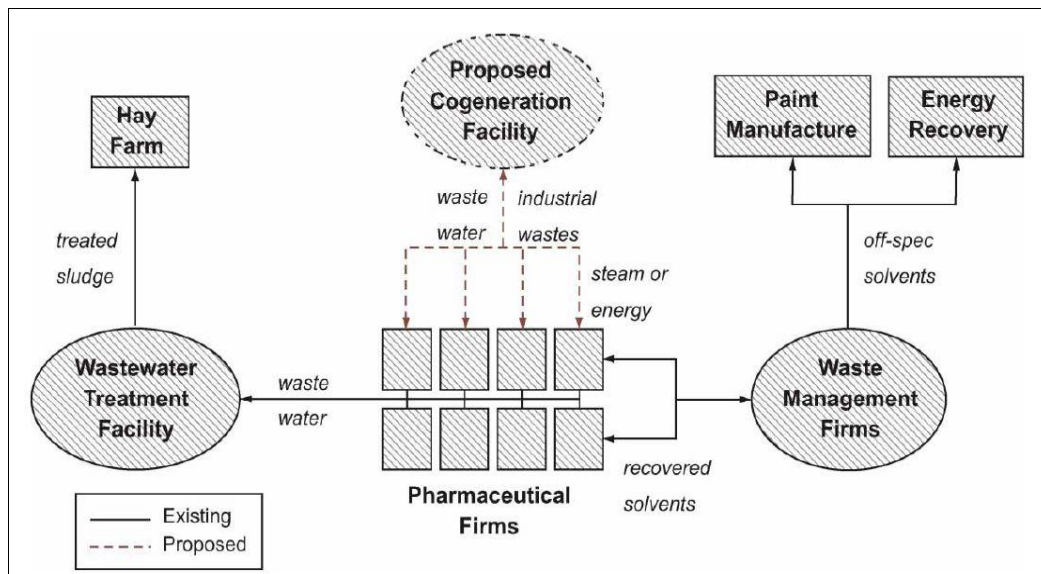


Figure 6. Parc éco-industriel de Barceloneta, Porto Rico en 2008 [25].

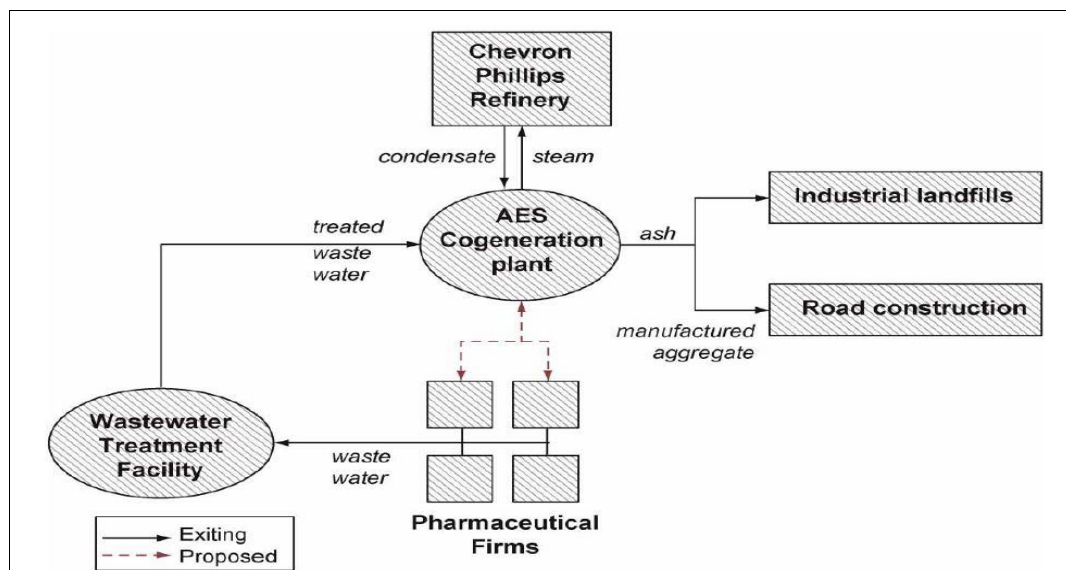


Figure 7. Parc éco-industriel de Guayama, Porto Rico en 2008 [25].

---

#### 1.4. Taxonomie et résumé des parcs éco-industriels

Après l'étude détaillée de dix-huit potentielles parcs éco-industrielle entre l'année 1997 et l'année 1999, Marian R Chertow a proposé une taxonomie des cinq types d'échange [26]. Selon mon point de vue, pour l'aspect de la modélisation mathématique, ses trois derniers types peuvent être résumés dans un seul type.

D'après Marian R Chertow, les échanges de matières dans une zone industrielle sont distingués en cinq types :

- Type 1: « échanges des déchets à une troisième partie ».
- Type 2: « dans un établissement, entreprise ou organisation ».
- Type 3: « parmi les entreprises en colocation dans un parc éco-industriel défini ».
- Type 4: « parmi les entreprises locales qui ne sont pas colocalisées ».
- Type 5: « parmi les entreprises organisées "virtuellement" dans une région plus large ».

Dans l'approche de Type 3, les entreprises et d'autres organisations situées dans un parc industriel peuvent échanger de l'énergie, de l'eau, et des matériaux et peuvent aller plus loin pour partager des informations et des services tels que le transport et la commercialisation.

Dans l'approche de Type 4, les échanges sont parmi les entreprises locales qui ne sont pas colocalisées dans une zone industrielle. L'échange de Type 4 prend comme point de départ ce qui est déjà en place dans une zone, reliant ainsi les entreprises existantes, avec la possibilité de remplir la zone des nouvelles industries.

Dans l'approche de Type 5, les échanges dépend de liens virtuels plutôt que sur la colocation. Parce que, étant donné le coût élevé de transport et d'autres raisons essentielles, très peu d'entreprises seront délocalisent uniquement pour faire partie d'une symbiose industrielle.

Les concepts de ces trois types sont similaires. Il faut souligner que les clés des différences entre les Types 3, 4 et 5 sont la portée géographique d'un parc industriel et les locations géographiques des industries. Pour modéliser un parc éco-industriel, la portée géographique d'un parc industriel et les locations géographiques des industries sont fixée comme des variables au début de la modélisation. Les ressources dans le parc sont considérées comme des ressources internes. Les ressources dehors du parc sont considérées comme des ressources externes. Donc les Types 3, 4 et 5 peuvent résumés dans un seul type expliqué dans la section 1.4.3.

---

#### 1.4.1. Type 1 : échanges des déchets à une troisième partie

De nombreuses entreprises recyclent des matériaux récupérés des autres entreprises et vendent ces matériaux recyclés à d'autres organisations. Le concept de Type 1 est montré sur la Figure 8. Selon des observations faites par Marian R Chertow, cette forme d'échange est typiquement unidirectionnelle et se concentre généralement au stade de fin de vie.

Les échanges sont discrets, plutôt que continus. Les flux d'échanges est matériel, plutôt que de l'eau ou de l'énergie. Échanges de Type 1 sont les plus éloignés de la définition de la symbiose industrielle. Ces types d'échanges s'appliquent généralement aux aspects plus traditionnels des flux de matières.



Figure 8. Illustration de Type 1 : un échange de déchet entre l'industrie 1 et l'industrie 2 doit être réalisé par un troisième acteur l'industrie 3.

#### 1.4.2. Type 2 : échanges des matières principalement dans l'intérieur d'une organisation

Le concept de Type 2 est montré sur la Figure 9. Certains types d'échange de matière peuvent se produire principalement à l'intérieur des limites d'une organisation. Les grandes organisations se comportent souvent comme si elles sont des entités distinctes et peuvent se rapprocher d'une approche multi-entreprise de symbiose industrielle.

Des gains importants peuvent être effectués dans une organisation en tenant compte du cycle de vie des produits, procédés et services, y compris les opérations en amont, telles que l'achat et la conception du produit.

L'utilisation de ce modèle est un projet mis en œuvre par l'Ebara Corporation à leur complexe végétal de Fujisawa, Japon. Ebara est un leader dans les machines industrielles, et pour son parc éco-industriel, il est construit sur les technologies de base.

Ebara travaille dans le domaine de la purification de l'eau, le traitement des eaux usées, l'incinération, la production d'électricité, et la récupération de chaleur. Grâce à une approche d'émissions zéro, ils commencent à intégrer ces technologies avec des activités à proximité. Une des technologies Ebara est mise en évidence dans le système de gazéification, de combustion et de cendres de fusion fluidisé qui convertit divers déchets et plastique dans les sorties en ammoniac, méthane et hydrogène.

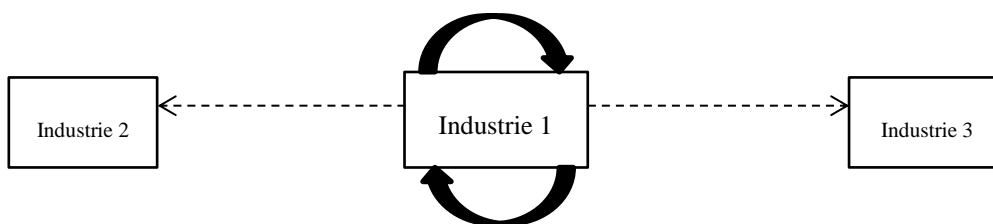


Figure 9. Illustration de Type 2: Les échanges se limite principalement dans l'intérieur de l'industrie 1 et probablement intègrent ces activités à proximité l'industrie 2 et l'industrie 3.

### 1.4.3. Type 3 : échanges principes parmi les entreprises colocation dans un parc éco-industriel définie

Dans cette approche, les entreprises et autres organisations situées dans un parc industriel peuvent échanger de l'énergie, de l'eau, et des matériaux et peuvent aller plus loin pour partager des informations et des services tels que le transport et la commercialisation.

Les échanges de Type 3 se produisent principalement dans la zone définie du parc industriel, mais il est possible d'impliquer d'autres partenaires "plus de la clôture." Les zones peuvent être de nouveaux développements ou la modernisation de celles déjà existante.

Les échanges de Type 3 peuvent être soit statiques et déjà bien planifiées dans éco-industrielle parc, soit dynamiques et flexibles par rapport aux nécessités et besoins des industries dans une éco-industrielle zone. Le concept de Type 3 est montré sur la Figure 10.

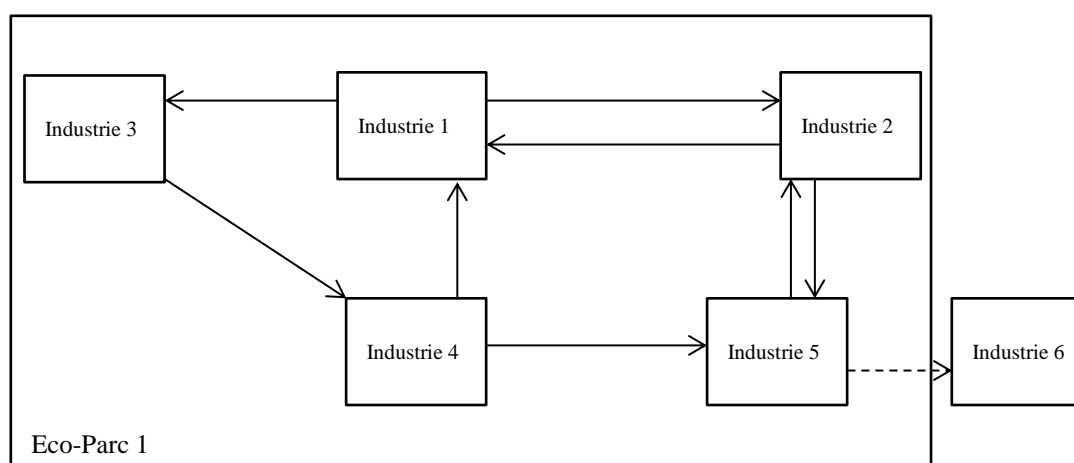


Figure 10. Illustration de Type 3: les échanges statiques entre les industries différentes dans un définie éco-industrielle parc, Eco-Parc 1, et probablement les échanges entre les industries intérieur de ce parc et les industries extérieurs, comme le flèche pointillé entre l'industrie intérieur 5 et l'industrie extérieur



---

#### **1.4.4. Résumé et challenge des parcs éco-industriels**

Selon des observations faites par Marian R Chertow, certains projets célèbres de parcs éco-industriels évoqués antérieurement ont montré que, ils ont commencés dans les années 70 et sont en auto-organisation dans le début de ses développements. Ensuite, le succès du premier parc éco-industriel, parc Kalundborg en Danemark, a recueilli l'attention du gouvernement, l'industrie et la recherche. Parcs éco-industriels sont devenus en mode de planification ou en mode de la combinaison de planification et auto-organisation.

Bien qu'un parc éco-industriel ait été lancé par la planification, les opérations quotidiennes d'échanges des flux de ce parc n'ont pas été surveillées. Il n'y a pas assez d'attention quantitative et de la flexibilité dans le concept actuel de parcs éco-industriels. En outre, ces parcs éco-industriels sont statiques. Pour une période de temps si certains changements se produisent dans les parcs, ils ne peuvent pas s'adapter aux défis rapidement.

#### **1.5. Modèles d'optimisation d'écologie industrielle**

##### **1.5.1. Modèles des exemples pour l'écologie industrielle**

Un modèle d'optimisation ont été créé pour sélectionner des processus optimales à partir d'un grand nombre de technologies existantes pour la production primaire de zinc et pour le traitement des résidus de zinc, et pour permettre à l'ingénieur de comparer ces techniques et de choisir la bonne combinaison d'opérations unitaires [27]. Ce modèle d'optimisation comprend les coûts de fonctionnement, les prix des métaux, les coûts environnementaux, et les facteurs de fractionnement Zn, Pb, Ag, et Fe.

Un modèle d'optimisation a été créé pour le recyclage des sous-produits et le démantèlement et le recyclage des produits en fin de vie [28]. Les applications annexes de ce modèle ont été faites pour la planification de la production et le recyclage en tenant compte de l'aspect environnemental dans les industries de l'acier.

Aux Pays-Bas, le recyclage des déchets de construction et en particulier de sable crée un problème logistique important. Un modèle d'optimisation en utilisant des procédures heuristiques a été proposé pour le recyclage des déchets de construction et en particulier de sable dans les Pays-Bas [29]. Précisément, une gestion de la logistique pour la création d'un réseau de recyclage du sable a été effectuée.

Un modèle d'optimisation linéaire décrit un système de gestion intégrée des déchets solides pour aider à identifier les stratégies de gestion des déchets solides de rechange qui prennent en compte le coût, l'énergie, et les objectifs d'émissions environnementales [30]. Ce système de gestion des déchets solides est composé de plus de quarante processus de l'unité pour la collecte, le transfert, la séparation, le traitement et l'élimination des déchets. La consommation d'énergie et émissions dans

---

l'environnement associé à la transformation de déchets à chaque processus de l'unité sont calculées.

Un modèle d'optimisation a été présenté qui agrandit les modèles d'optimisation linéaires bien connus pour des problèmes de planification de production conjointe en intégrant des sous-produits et résidus ainsi que les impôts sur les émissions [31]. En ce qui concerne les implications techniques d'un processus du monde réel, le modèle a été basé sur des calculs des équilibres thermodynamiques et donc formulé comme un modèle d'optimisation non linéaire pour les industries de synthèse d'ammoniac.

Un modèle d'optimisation pour la collecte, le prétraitement et la redistribution des déchets de tapis a été présenté [32]. Ce modèle se distingue des autres modèles mathématiques, car il appuie la conception de la structure logistique de réseaux de réutilisation entre autres dans une liberté totale de choix des emplacements de prétraitement et prenant explicitement en compte les coûts d'amortissement.

Un modèle a été proposé pour évaluer la symbiose industrielle dans les industries forestières [33]. En utilisant ce modèle, à la fois l'énergie et le flux de matières à la fois sur l'offre et la demande peut être étudiée simultanément. De plus, ce modèle pourrait être utilisé pour trouver des améliorations dans la structure du système modélisé, pour trouver la stratégie opérationnelle optimale d'un système donné, et pour évaluer et comparer les différents systèmes.

Un modèle d'analyse de l'utilisation de carburant et les émissions de gaz de serre d'une zone industrielle de type forestière en Finlande a été fait en utilisant une approche de cycle de vie [34]. En plus de l'utilisation et les émissions de carburant direct, les émissions résultant de la production de matières premières, la production de combustibles et les procédés de gestion des déchets principaux sont également inclus dans le modèle. Le transport est pris en compte. Les améliorations potentielles de la performance environnementale du système sont discutées. La pertinence d'une symbiose industrielle, en particulier pour les industries des pâtes et papiers, son déplacement vers une consommation de carburant plus durable et sa réduction des émissions de gaz de serre sont analysés.

Un modèle pour résoudre le problème de la répartition de l'eau dans les usines de transformation à l'aide de la programmation linéaire a été présenté [35]. Des exemples ont montré que le problème a plusieurs solutions optimales alternatives, y compris les cas dégénérés où les flux d'eau à travers les processus sont plus grands que le minimum requis. Les transferts obligatoires de l'eau d'un processus à l'autre ont également été résolus. Les travaux de recherche ont des conséquences importantes pour la conception et l'ajustement de rétro des systèmes d'utilisation de l'eau, car il fournit un outil pour obtenir plusieurs solutions alternatives.

Un modèle génère le coût annuel total minimal et il est possible de contrôler la complexité du motif d'écoulement sortant [36]. Les procédés automatisés ont été développés pour la synthèse de systèmes d'eau industriels. De nombreuses contraintes

---

pratiques peuvent être incluses, par exemple, les connexions obligatoires ou interdits, le géographique, le contrôle ou les contraintes de sécurité.

Les techniques de modélisation de la distribution de l'eau, un sujet bien développé, ont été appliquées à la gestion de l'eau dans un parc de Bayport du complexe industriel de fabrication de produits chimiques, à Houston, au Texas, aux États-Unis. Linéaire et d'autres approches de programmation mathématique ont été utilisés pour évaluer les possibilités de réutilisation de l'eau pour une variété de scénarios, y compris la refonte du réseau de l'utilisation industrielle de l'eau, l'ajout d'une installation sur le réseau, pour limiter la quantité totale d'eau disponible pour le réseau, et pour faire varier le prix d'eau. Les résultats de la modélisation montrent qu'un certain nombre de possibilités économiques de réutilisation de l'eau peut exister pour ce réseau d'installations [37].

L'article [38] présente un modèle pour le ciblage réutilisation de l'eau au maximum dans les systèmes de traitement. Deux cas sont considérés. Dans le premier cas, le transfert de masse est modélisé en termes de charge de masse fixe. Cela conduit à un problème qui peut être résolu en tant que problème d'optimisation non linéaire. Dans le second cas, le transfert de masse est modélisé en termes de concentration de sortie fixe. Cela conduit à un problème qui peut être résolu en tant que problème d'optimisation linéaire.

Pour apprendre l'influence de symbiose industrielle sur le système industriel actuel chinois charbon chimique, un modèle de systèmes d'éco-industriels-chimiques charbon a été construit [39]. En utilisant l'optimisation du scénario et la programmation linéaire, les comportements et les structures industrielles optimales du système et les paramètres du scénario ont été comparés, et l'analyse écologique industrielle a été réalisée.

### **1.5.2. Taxonomie et résumé sur les modèles d'optimisation d'écologie industrielle**

Les modèles à optimiser les flux dans les industries d'un certain type et les modèles à optimiser les flux d'un certain type parmi les industries ont été étudiés avec rigueur. Un revu de littérature de modèles d'optimisation pour la conception de parcs éco-industriels a été fait [40], et il y a une taxonomie de trois types de modèles :

- L'optimisation du réseau d'eau dans un parc éco-industriel.
- L'optimisation du réseau d'énergie (du certain type) dans un parc éco-industriel.
- L'optimisation du partage de matériel (du certain type) dans un parc éco-industriel.

La principale difficulté de l'optimisation d'un réseau de partage d'un parc éco-industriel est la multiplicité des matières produites ou utilisées dans un parc composé d'un grand nombre de sociétés très différentes.

---

Par conséquent, au contraire de les études développées fortement sur les modèles de l'optimisation du réseau du certain type de flux de matériel, très peu d'études proposent une modélisation générale pour optimiser les flux des échanges. Bien que, en réalité, des exemples de partage matériaux dans des parcs éco-industriels existent vraiment, ils ne sont pas souvent parlés dans les travaux de recherches de la modélisation et de l'optimisation. Seules quelques études sont évoquées.

### **1.6. Outils informatiques pour parcs éco-industriels**

La recherche montre que nombreux outils d'information et de la technologie de communication pour le développement de la symbiose industrielle ont été créés.

Certains projets ont été annulés [41]. Les outils sont :

- DIET-Designing Industrial Ecosystems Toolkit [42].
- FaST-Facility Synergy Tool [42].
- REaLiTy-Regulatory, Economic and Logistics Tool [42].
- IME-Industrial Materials Exchange Tool [43].
- WasteX [44].
- IEDP-Industrial Ecosystem Development Project [45].

Les projets de recherche d'outils informatiques pour le développement de la symbiose industrielle énumérés suivants ont été achevés et les descriptions sont en détails dans les sous-secteurs :

- CRISP-Core Resource for Industrial Symbiosis Practitioners [46] [47].
- SymbioGIS [48].
- IUWAWM of Institute of Eco-Industrial Analysis Waste Manager [49].
- e-Symbiosis [50].
- RUES-Residual Utilization Expert System [51].
- IEPT-Industrial Ecology Planning Tool [52].
- MatchMaker! [53].
- DIME-Dynamic Industrial Materials Exchange Tool [54].
- Presteo [55] [56].
- KBDSS-Knowledge-Based Decision Support System [57] [58].

### 1.6.1. Presteo, Suisse

La partie essentielle de Presteo est sa base de données. Presteo peut trouver des synergies industrielles potentielles selon la location réelle de chaque industrie. Ce logiciel est destiné à détecter et mettre en œuvre des synergies sous-produits entre les acteurs industriels en utilisant du concept 'Input-Output Matching'.

Un outil de gestion de base de données pour le traitement des données de l'analyse Input-Output et des outils SIG (Système d'Information Géographique) pour détecter les partenaires industriels potentiels sont constamment validés. À notre meilleure connaissance, dans Presteo, il n'y a pas de partie de la modélisation d'optimisation.

### 1.6.2. IEPT-Industrial Ecology Planning Tool, États-Unis

IEPT est un outil qui identifie les scénarios de réutilisation d'eau avec le coût optimal. La modélisation incluse dans IEPT utilise un algorithme de la programmation linéaire dans un SIG (Système d'Information Géographique). Il fournit un outil quantitatif pour promouvoir des cycles efficaces de matériaux basés sur le système. Son interface d'utilisateur est détaillée dans la Figure 11.

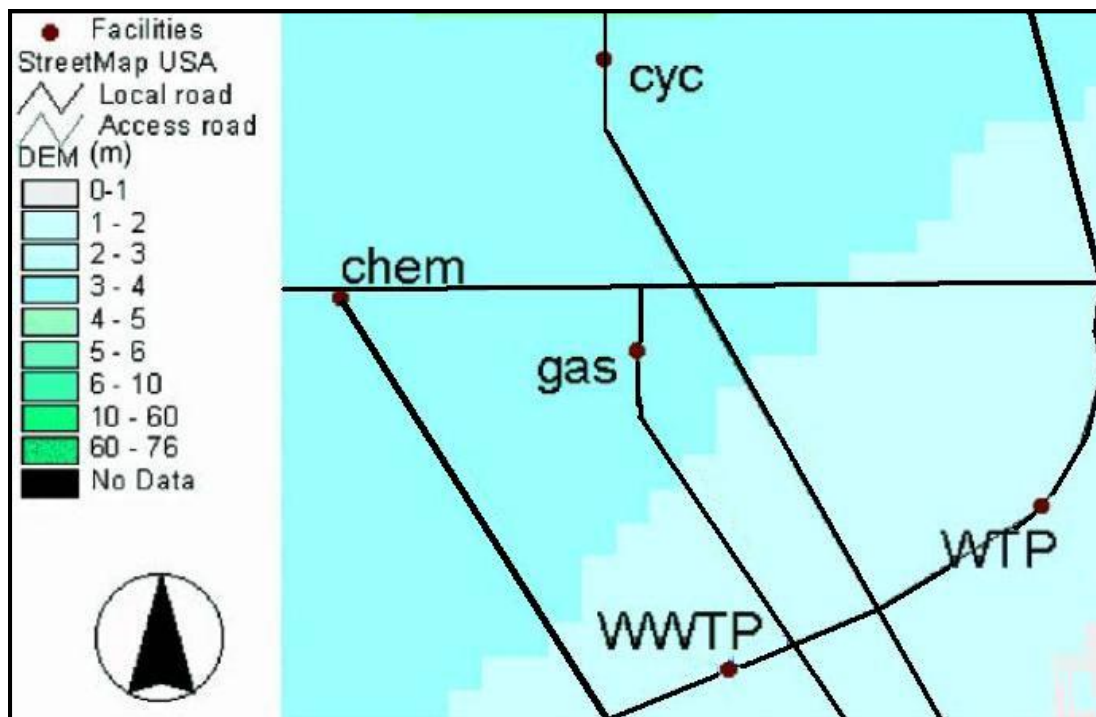


Figure 11. Un exemple de carte de base d'IEPT pour un petit réseau d'installations, dont une usine de traitement de l'eau (CAP), une usine de traitement des eaux usées (STEP) et trois usines de fabrication (CHM, GAZ et CYC). [52].

### 1.6.3. e-Symbiosis, Royaume-Uni/Grèce

e-Symbiosis est un système expert en utilisant l'ingénierie ontologique pour modéliser la réutilisation des matériaux et pour établir le recyclage. Les connaissances d'e-Symbiosis viennent des experts et des praticiens de la symbiose industrielle. Cette approche est développée à réutiliser et à combiner des données avec la connaissance qui se rapporte aux propriétés du gaspillage des ressources, des mesures et des indicateurs de durabilité.

### 1.6.4. IUWAWM of Institute of Eco-Industrial Analysis Waste Manager, Allemane

IUWAWM est un gestionnaire des déchets, et il est une application de base de données sur Microsoft Access, une composante majeure de la généralisation Microsoft Office Package. Il utilise le concept 'Input-Output Matching'. Dans la partie de son concept, les flux du type 'Information' sont inclus, comme montré sur la Figure 12. C'est un point d'innovant d'IUWAWM par rapport aux autres systèmes. Comme on le voit dans le modèle de la relation de l'entité, montré sur la Figure 13, IUWAWM est composé d'un ensemble de tableaux reliés.

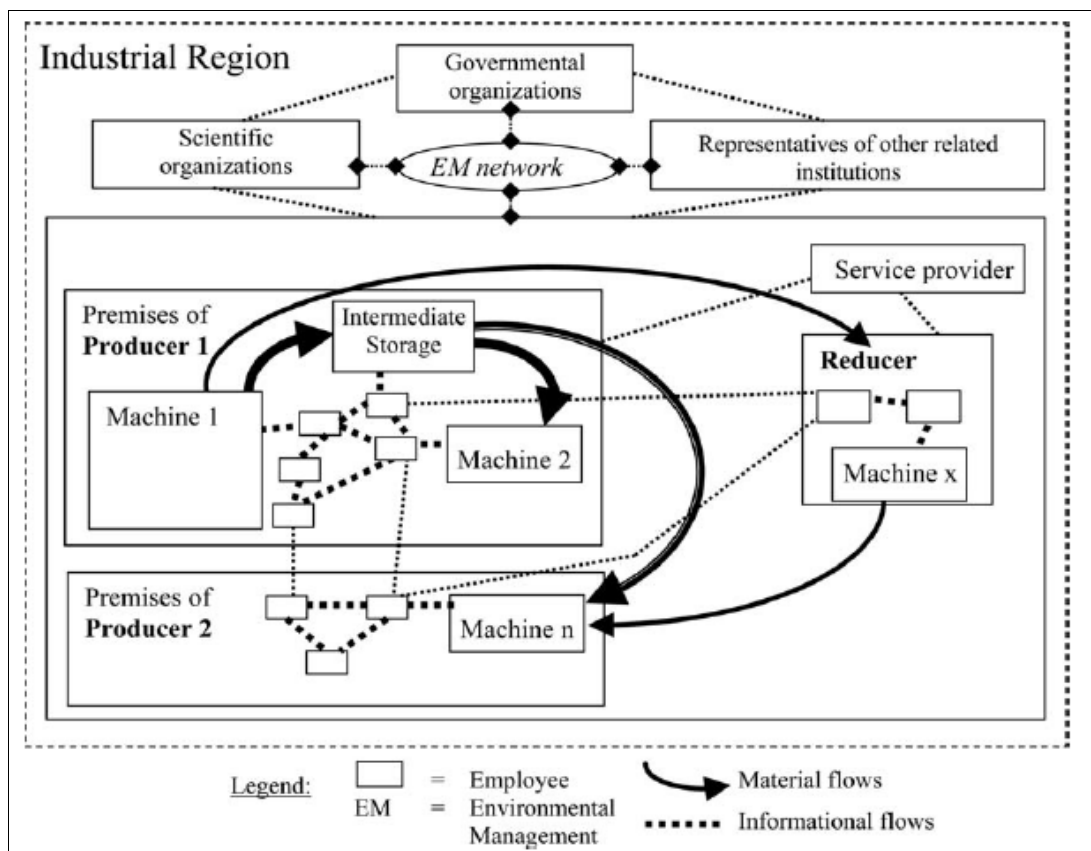


Figure 12. Concept de IUWAWM [49].

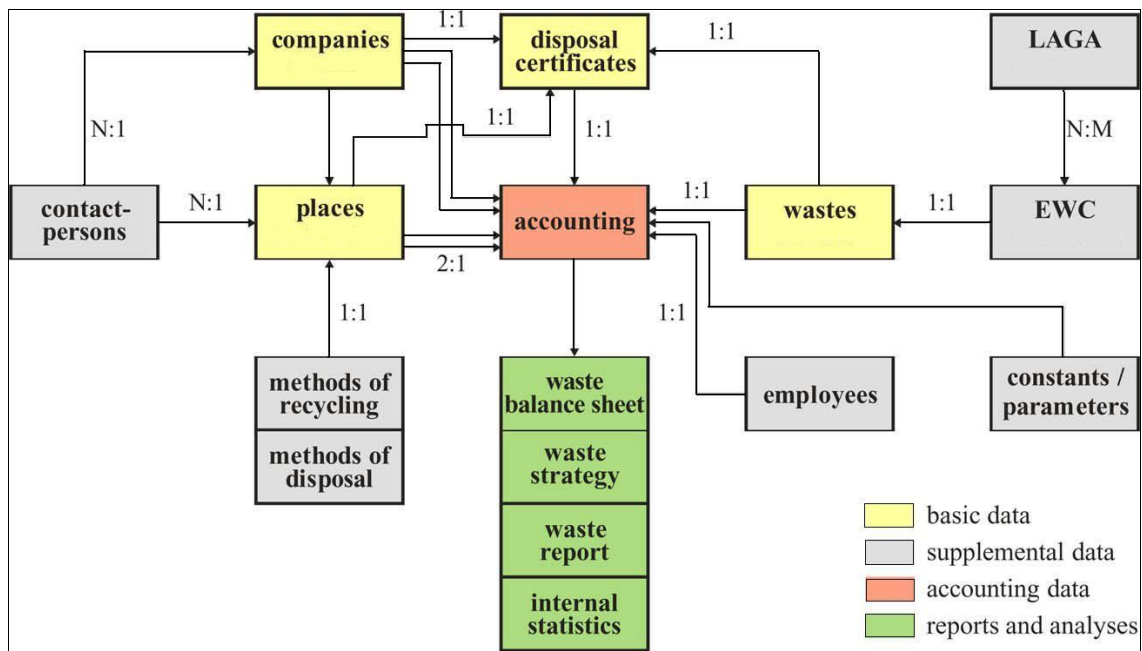


Figure 13. Modèle d'entité de relation de l'ITUWAWM [49].

### 1.6.5. MatchMaker!, États-Unis

MatchMaker! est un produit de base de données relationnelle. Il organise et traite les informations détaillées des flux de matériaux sur les installations spécifiques et les types des industries génériques. En utilisant les données d'entrée et de sortie pour les flux de matériel au sens large, par exemple, solide, liquide, et éléments gazeux, y compris la vapeur et l'eau, MatchMaker! est capable de générer des rapports qui recommandent des liens symbiotiques potentiels entre les installations.

### 1.6.6. SymbioGIS, Suisse

SymbioGIS créer une valeur ajoutée pour la détection de la symbiose industrielle et il effectue des évaluations de faisabilité et d'évaluation des risques industriels. Le noyau de SymbioGIS, sa base de données sur les flux de matières, pourrait promouvoir une symbiose industrielle qui a un grand potentiel en tant que nouveau calque pour l'aménagement du territoire et le développement économique.

SymbioGIS peut être utilisé pour définir des priorités et pour détecter des gains rapides pour une utilisation efficace des ressources locales.

### 1.6.7. RUES- Residual Utilization Expert System, États-Unis

RUES est basé sur un système expert informatique. Il est également un système automatisé qui peut évaluer efficacement les solides industriels déchets et leurs utilisations potentielles dans les applications de construction de routes. En adoptant

---

une approche fondée sur la connaissance, le système répond aux besoins des réutilisations des déchets.

#### **1.6.8. DIME-Dynamic Industrial Materials Exchange Tool, États-Unis**

L'objectif de DIME est à réduire le volume des déchets et la pollution, à réduire le coût de transport et le coût de traitement des déchets, et à réduire la consommation nette des ressources naturelles.

DIME comprend un modèle de planification propriétaire appelé EMIP (Echange des Matériaux Industriels Planer), qui vise à aider la conception des complexes industriels intégrés caractérisés par des multiples fermé change boucles des produits, des sous-produits et des déchets. Et il comprend également un outil puissant développé par MIT (Massachusetts Institute of Technology) appelé SD (Système Dynamique). SD est une approche analytique qui examine les systèmes complexes à travers l'étude de la structure du système sous-jacent.

#### **1.6.9. KBDSS-Knowledge Based Decision Support System, Nouvelle-Zélande/Canada**

KBDSS est un système expert qui aide à la décision. Il est, basé sur la connaissance, pour déterminer les options de gestion des déchets pour tous les types des déchets provenant d'une ou plusieurs installations industrielles, en donnant la priorité à l'utilisation durable des ressources, la réutilisation et le recyclage.

Un prototype a été développé dans KBDSS pour déterminer les potentiels des réutilisations et des recyclages des déchets, pour sélectionner les traitements nécessaires pour recycler les déchets, et pour déterminer les potentiels des co-traitements des déchets.

#### **1.6.10. CRISP-Core Resource for Industrial Symbiosis Practitioners, Royaume-Uni**

CRISP est un système d'information qui peut trouver la meilleure synergie entre les industries en utilisant le concept 'Input-Output Matching'. Il se concentre en particulier sur la question de la distance et toujours s'identifie et s'applique avec succès les synergies des ressources entre des secteurs industriels. Il travaille généralement sur une zone industrielle d'un rayon géographique d'entre 32,8 kilomètres et 62,91 kilomètres.

#### **1.6.11. Taxonomie et résumé sur les outils informatiques pour parcs éco-industriels**

Après l'étude sur les outils pour l'écologie industrielle, Marian R Chertow a proposé une taxonomie des trois types des outils différents pour les parcs



éco-industriels [26]. A mon point de vue, selon l'aspect de la technologie informatique, ses trois types peuvent être résumés en deux types:

- Input-Output Matching.
- Material Budgeting.

Les outils de type 'Input-Output Matching' aident à appairer les entrées et les sorties des différentes entités qui pourraient participer à la symbiose industrielle. Les outils de type 'Material Budgeting' pourrait être utilisé pour cartographier les flux de matières et d'énergie grâce à un système choisi.

Les parties de la modélisation sont inclus dans les outils de type 'Material Budgeting', mais pas dans les outils de type 'Input-Output Matching'.

Après l'étude détaillée des dix outils informatiques évoqués précédemment pour les parcs éco-industriels, la plupart des outils sont basées sur un système d'expert en utilisant le concept 'Input-Output Matching', comme illustré dans le Tableau 1.

Donc, nous pouvons souligner que la modélisation et la programmation mathématique n'sont pas populaires et n'sont pas beaucoup développées dans le domaine d'écologie industrielle.

Tableau 1. Taxonomie d'outils informatiques pour parcs éco-industriels.

Nom d'outil informatique	Pays	Type	Programmation Mathématique (Modélisation/Optimisation)
Presteo	Suisse	Input-Output Matching	Non
IEPT	États-Unis	Material Budgeting	Oui (Programmation linéaire)
e-Symbiosis	Royaume-Uni/Grèce	Input-Output Matching	Non
IUWAWM	Allemane	Input-Output Matching	Non
MatchMaker!	États-Unis	Input-Output Matching	Non
SymbioGIS	Suisse	Input-Output Matching	Non
RUES	États-Unis	Input-Output Matching	Non
DIME	États-Unis	Material Budgeting	Oui (Système dynamique)
KBDSS	Nouvelle-Zélande /Canada	Input-Output Matching	Non
CRISP	Royaume-Uni	Input-Output Matching	Non

---

# **Chapitre2. État de l'art de CSC-Captage et Stockage du Carbone et CCU-Carbone Captage et réUtilisation**

---

---

---

## 2.1. Technologie Captage et Stockage du Carbone (CSC)

### 2.1.1. Introduction de la technologie Captage et Stockage du Carbone (CSC)

Le captage et stockage du carbone (CSC) est une technologie qui permet de capturer le dioxyde de carbone présent, par exemple dans les fumées, pour obtenir du dioxyde de carbone fortement concentré [59] [60]. Le projet CSC à Lacq en France est un projet pilote de la technologie CSC conduit par Total, illustré par la Figure 14. Le coût de la technologie CCS varie selon le type d'industrie. La recherche a montré que le coût de la technologie CCS va diminuer dans les prochains dix ou vingt ans.

La chaîne CCS se compose de trois parties [61] :

- Captage et Compression: capturer le dioxyde de carbone par trois méthodes principales : précombustion, postcombustion et oxycombustion. Les concepts de ces trois méthodes sont montrés sur la Figure 15.
- Transport : transport le dioxyde de carbone capturé par trois moyens : camion, navire et pipeline [62] [63].
- Stockage: stocker le dioxyde de carbone capturé en toute sécurité par deux façons principales : sous terre dans les champs de pétrole et de gaz appauvri et sous profondes formations aquifères salins [64].

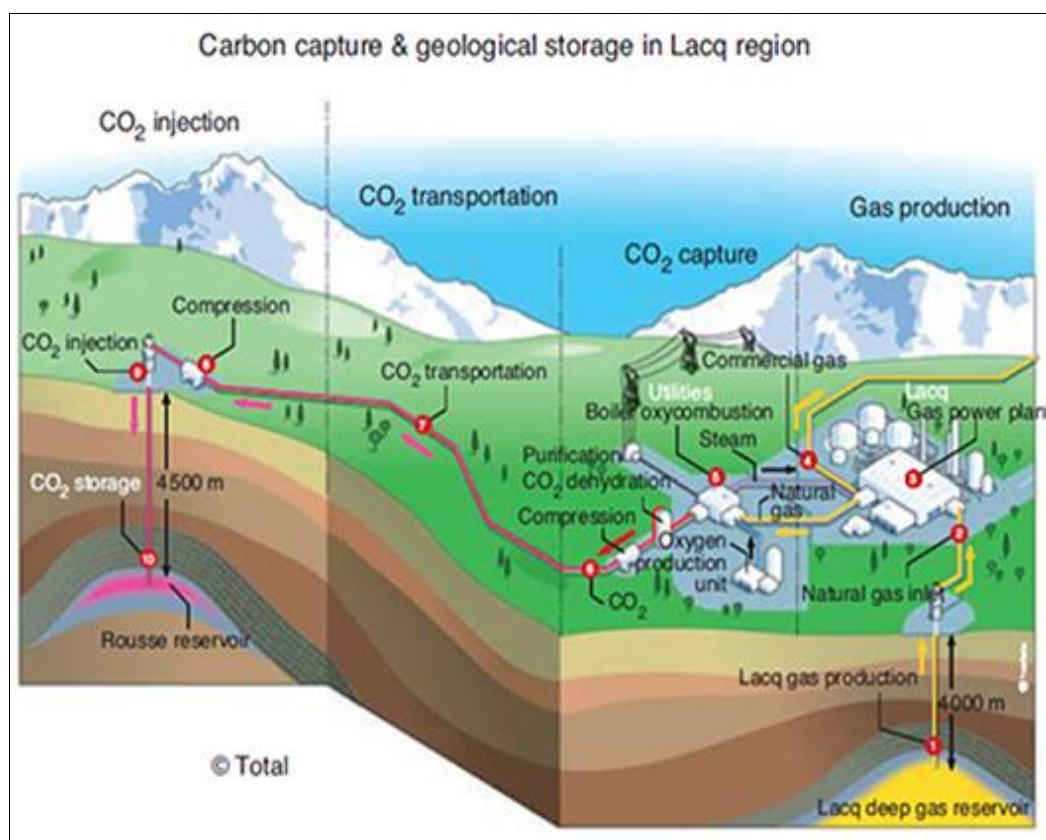


Figure 14. . Illustration de projet CSC à Lacq, France.

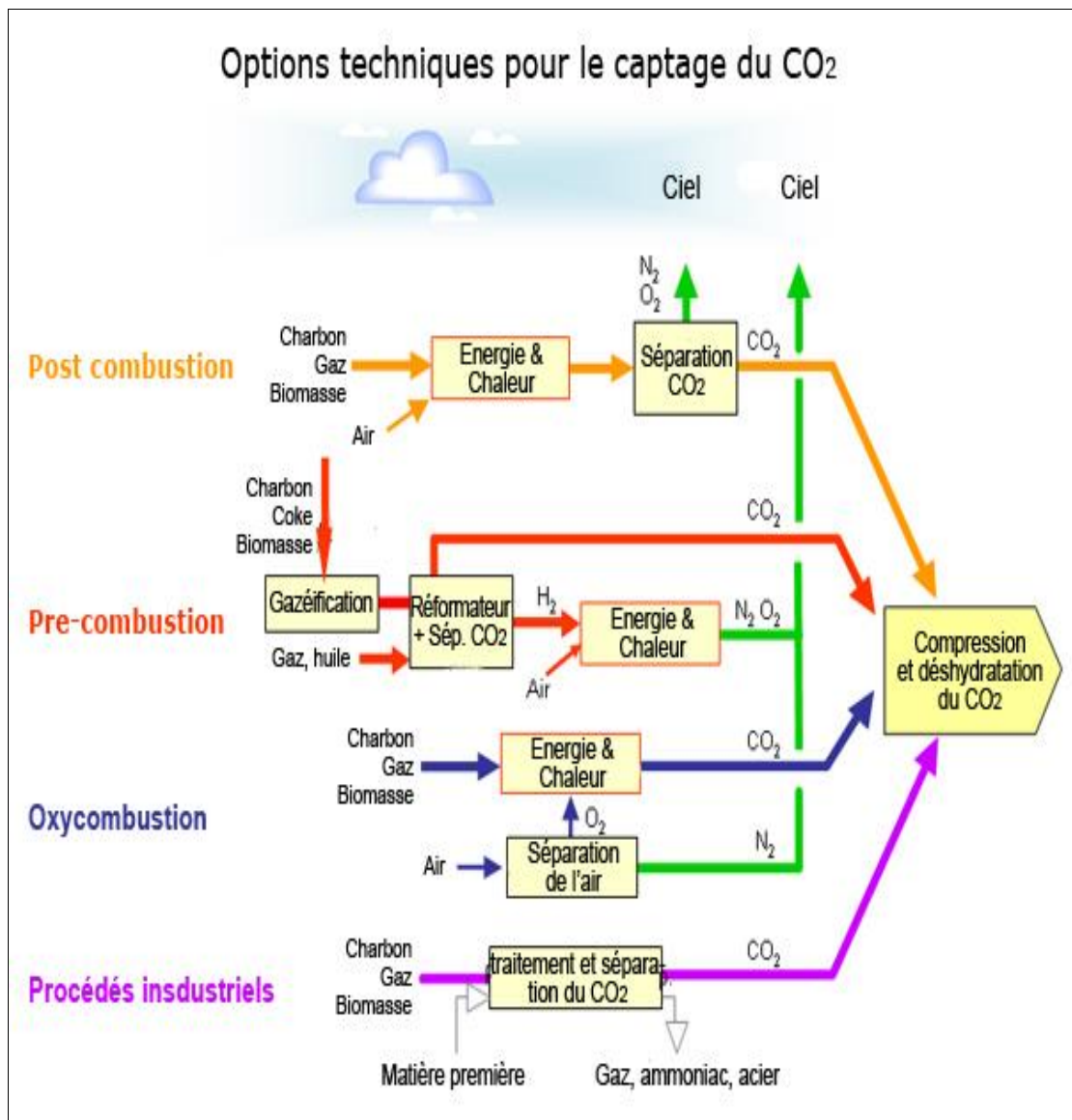


Figure 15. Vue d'ensemble des processus et des systèmes de captage de CO<sub>2</sub> [61].

### 2.1.2. Captage et Compression de la technologie CSC

Les études de coûts de captage de dioxyde de carbone sont réalisées, et la plupart des recherches sont basées sur les centrales électriques [65] [66] [67] [59] [61] [68] [69]. Dans la littérature, le coût de captage du dioxyde de carbone peut être résumé dans le Tableau 2 et Tableau 3. Les détails seront présentés dans le chapitre 4.

Tableau 2. Coût de Captage CO<sub>2</sub> dans les centrales électriques [61]

Type de centrale électrique	Gamme de coût de captage (\$US/tCO <sub>2</sub> )
Centrale à charbon	31-56
Centrale à gaz naturel	33-57
Centrale à cycle combiné (charbon et gaz naturel)	11-35

Tableau 3. Coût de Captage CO2 dans les industries de type traitement de gaz naturel et de type raffinerie [70].

Source CO2	Coût de captage (\$US/tCO2)
De Chaudières de l'usine de traitement de gaz naturel	22
De Chaudières et Turbines Gaz de l'usine de traitement de gaz naturel	26,2
De Turbines Gaz de l'usine de traitement de gaz naturel	32,2
D'Oxydants Thermiques de l'usine de traitement de gaz naturel	28,8
De Gaz Acide de l'usine de traitement de gaz naturel	16
De l'unité de Craquage Catalytique d'une raffinerie	185-255
De l'unité de Cogénération d'une raffinerie	185-255

### 2.1.3. Transport de la technologie CSC

Les études sur les modélisations des coûts de transport de dioxyde de carbone capturés sont développées. [71] [72] [62] [63] [68] [73]. Les détails seront présentés dans le chapitre 4. Le résultat d'une étude de coût de transport de dioxyde de carbone avec la distance de deux cent cinquante mètres est montré sur la Figure 16.

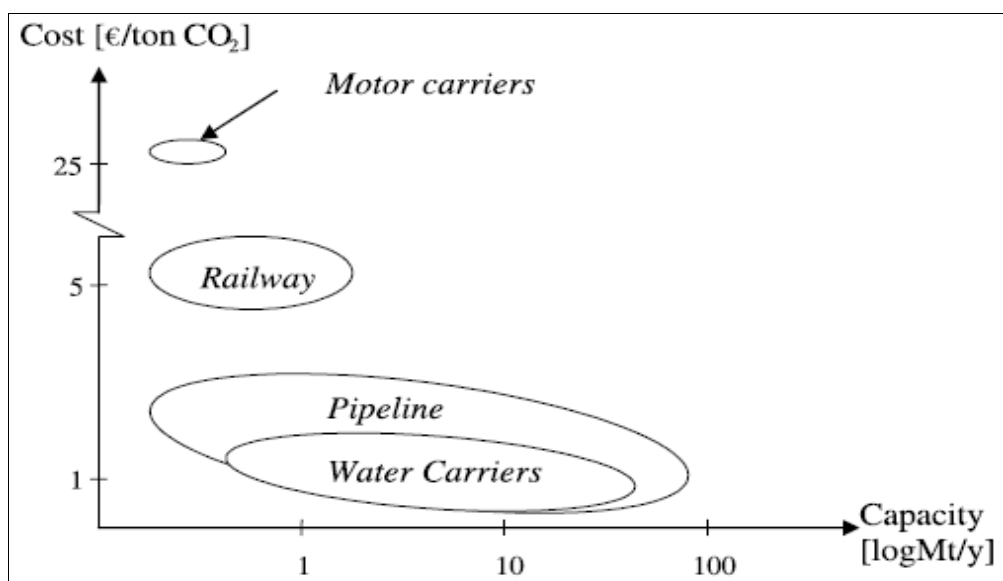


Figure 16. Le coût de transport de CO2 à 250 km [63].

---

## 2.2. Technologie Carbone Captage et réutilisation (CCU)

Dans le rapport du Global CCS Institute [68] [74], la réutilisation du dioxyde de carbone ont été cataloguée dans dix voies. Pour un parc éco-industriel opérationnel avec une distance limitée, les techniques les plus pratiques pourraient être brièvement résumées comme suit:

- Pour la culture d'algues.
- Pour la minéralisation de carbonate.
- Pour la bauxite résidu carbonatation.
- Pour la transformation des polymères.
- Pour le durcissement de béton.
- Pour la production de carburant liquide.
- Pour le rendement de l'urée stimulé.

### 2.2.1. CCU-La culture d'algues

#### 2.2.1.1. Introduction de la technologie CCU pour la culture d'algues

Le dioxyde de carbone peut stimuler la croissance des algues. Productivité et rendement peuvent être sensiblement augmentés par barbotage de dioxyde de carbone grâce à des systèmes de culture d'algues.

Actuellement, il y a beaucoup d'intérêt dans le potentiel des algues pour produire du biocarburant, qui est un liquide combustible de substitution de transport, à un prix compétitif par rapport au pétrole brut. Un examen des algues pour la production de biocarburants et de ses autres applications peut être trouvé [75].

Au cours de la croissance des algues, les algues peuvent aider à la purification des eaux [76] [77] [78] [79]. L'huile extraite de biomasse algale serait principalement une matière première pour la production de biocarburants et les produits chimiques. Le solde de la biomasse des algues séchées après extraction peut être utilisé comme combustible solide à brûler dans les chaudières industrielles et les sources de production d'électricité.

Une conception simplifiée pour réutiliser le dioxyde de carbone dans la culture d'algues secteur [76] est illustré par la Figure 17. La production d'énergie par l'intermédiaire de la conversion de la biomasse de micro-algues est illustrée sur la Figure 18. Des procédés de combustion directe biochimique, thermochimique et chimique sont utilisés dans la production.

Depuis 2007, il y a eu une explosion de la recherche sur la valorisation des algues, principalement tirée par la possibilité commerciale inhérente à attirer liquide marché des carburants de transport [68]. Les pays qui ont une longue feuille de route dans

cette recherche sont l'Israël, le Japon, la Chine et les Etats-Unis, l'Australie et la Nouvelle-Zélande. Ils sont maintenant à la recherche de grandes collaborations axées sur les industries.

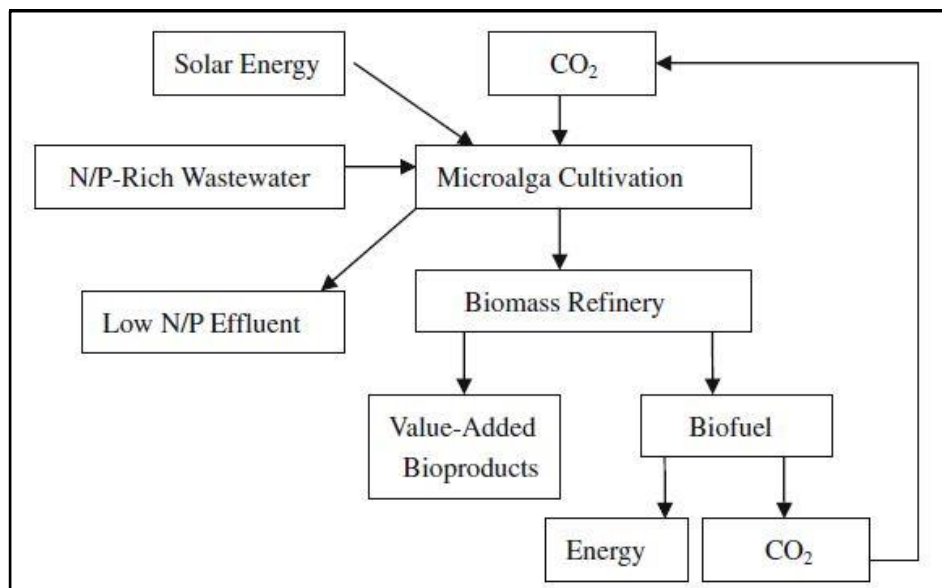


Figure 17. Un système de micro-algues conceptuel pour la production combinée des biocarburants, CO<sub>2</sub> bio-atténuation, et N / P élimination des eaux usées [76].

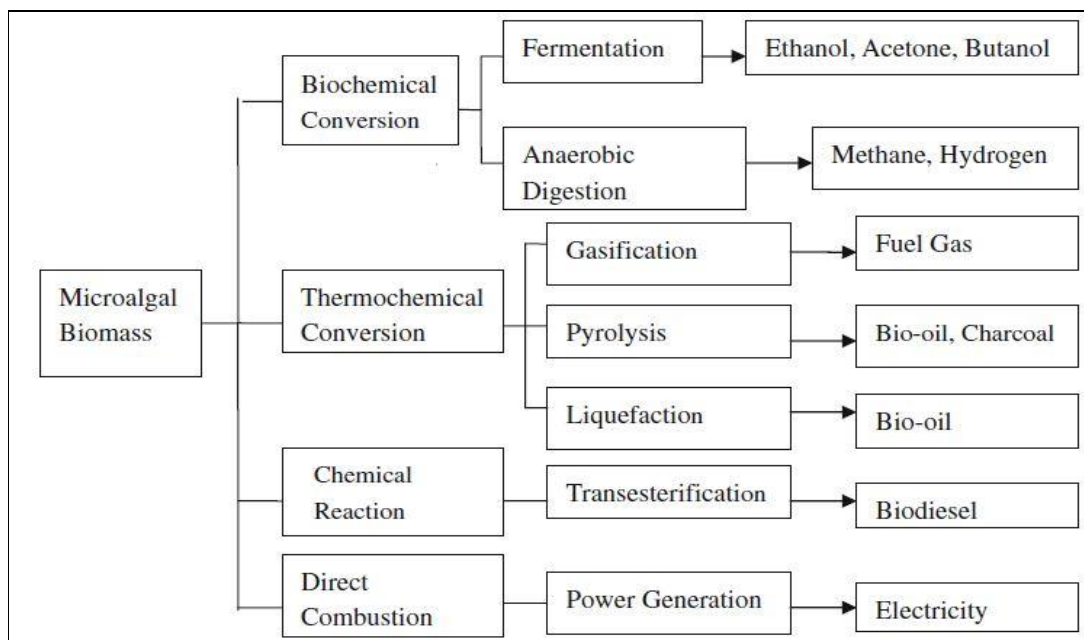


Figure 18. La production d'énergie via la conversion de la biomasse de micro-algues utilisant biochimique, thermochimique, chimique, et les processus de combustion directe [76].



### 2.2.1.2. Coûts liés de la technologie CCU pour la culture d'algues

Environ deux tonnes de dioxyde de carbone seront consommés par tonne de biomasse sèche d'algues produites, bien que cela varie selon les espèces et les conditions de culture [68].

Fermes d'algues sont volumineux et coûteux [80]. Le coût de production de l'huile d'algue dans un système à pleine échelle a été estimé et listé dans le Tableau 4 [81]. La production de micro-algues mondiale actuelle est proche de dix kilotonnes de biomasse sèche par an.

Les prix actuels d'algues sont compris entre 5000 et 11000 \$US par tonne. Le coût de production d'algues en photo-bioréacteurs est de 10 \$US par kg. Les microalgues pourraient devenir une source de matière première pour produire du biocarburant à ce niveau de coût.

Le coût de la biomasse pourrait être réduit à 4 \$US par kg par l'amélioration de la balance énergétique. En faisant l'usage de résidus, y compris les eaux usées et le CO<sub>2</sub> des gaz de combustion, et les améliorations technologiques le prix pourrait réduire de dix fois à 0,40 \$US par kg.

Pour la production possible des biocarburants, l'ensemble de la biomasse algale devrait être utilisé, comprenant environ 50% d'huile (d'une valeur de 0,40 \$US par kg), 40% de protéines (d'une valeur de 1,20 \$US par kg) et 10% de sucres (d'une valeur de 1,00 \$US par kg). Cette approche de la bio-raffinerie provoque la valeur de la biomasse à monter à 1,65 \$US par kg qui serait suffisant pour la production commerciale des carburants [80] [81].

Tableau 4. Coûts liés de technologie CCU-La culture d'algues.

Relatif coût / prix	Gamme (\$US)	Unité
Les coûts d'investissement pour les fermes d'algues	13,8	$m^3$
Les coûts d'exploitation pour les fermes d'algues	4,38	$m^3 \bullet an$
Coût de production de l'huile d'algue	0,70	l
Algues prix du marché	5 à 11	kg
Coût de production des algues	3,8 à 10	kg
Coût de la biomasse	0,4 à 4	kg

### 2.2.2. CCU-La minéralisation de carbonate

#### 2.2.2.1. Introduction de la technologie CCU pour la minéralisation de carbonate

La minéralisation de carbone est la conversion de dioxyde de carbone en carbonates minéraux solides [68]. L'olivine, le serpentine et le wollastonite sont considérés comme les trois sources de minéraux les plus appropriés. Les deux processus

principaux sont la carbonatation directe et la carbonatation indirecte et leurs concepts sont illustrés sur la Figure 19 [81]

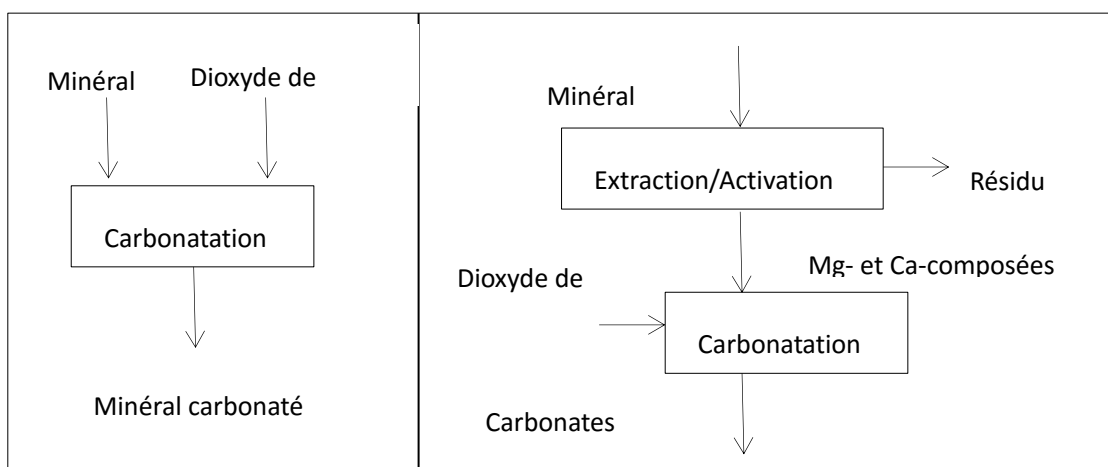


Figure 19. (À gauche) concept de processus de carbonatation directe; (à droite) indirecte concept de processus de carbonatation (source : [81]).

Outre ces réserves naturelles, divers produits de déchets industriels et vapeurs peuvent être une source pour la carbonatation, par exemple Magnésium et Calcium [82] [83] [84]. Ces produits de déchets industriels pourraient être principalement les scories d'acier, de la poussière de ciment four, les déchets de béton et de cendres volantes de charbon.

Précisément, des résidus industriels et vapeurs riches en magnésium ou en calcium pourraient être utilisés comme sources de dioxyde de carbone, par exemple les granulats de béton recyclé, d'acier et de hauts fourneaux scories, les poussières des cimenteries, les cendres volantes, les déchets municipaux cendres d'incinération, les cendres de la biomasse, les cendres de papier de boue, les déchets miniers et l'amiante. Ils proviennent de plusieurs secteurs de l'industrie comme l'industrie minière du fer, l'industrie de fabrication de l'acier, le ciment, les incinérations, la production d'énergie, et l'industrie du papier. [82] [85] [86] [87] [88] [89].

L'utilisation directe de la centrale de gaz pourrait également être possible. Un schéma de procédé simplifié de la carbonatation aqueuse directe est donné sur la Figure 20.

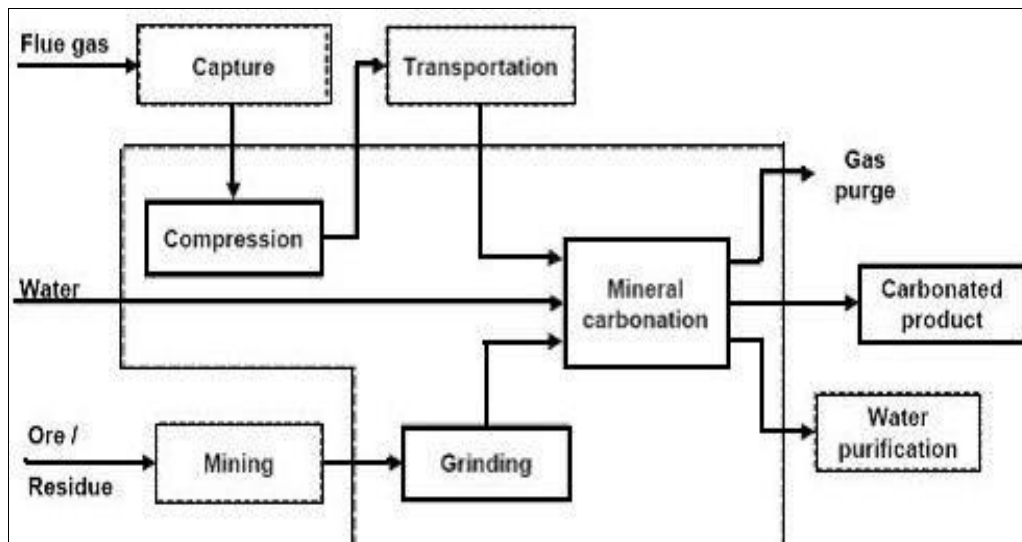


Figure 20. Simplifié carbonatation aqueuse directe [81].

Le carbonate de calcium est un exemple de produit commercial [90], avec un exemple de procédé de production de carbonate de calcium à partir de déchets de ciment et de dioxyde de carbone, et l'exemple est illustré par la Figure 21. Un vaste marché existe pour le carbonate de calcium précipité synthétique ou pour des applications dans l'industrie des produits du papier, des matières plastiques, caoutchouc et de la peinture.

Le breveté de processus de minéralisation de dioxyde de carbone de l'industrie, Skyonic Sky mine, le premier système à but lucratif conversion fumée de dioxyde de carbone de gaz en bicarbonate et bicarbonate de soude, comme principal produit commercial, est un exemple réussi de réutilisation de dioxyde de carbone dans la minéralisation de carbonate.

Le carbonate de magnésium ou de silice peut trouver ses utilisations importantes comme exhausteurs de sol, les remblais pour des routes, les travaux de construction ou de la charge, dans les opérations minières.

Le nouveau produit de l'industrie Lafarge, SOLIDIA, initié avec laquelle Lafarge développe un processus de carbonatation de la Wollastonite et crée un nouveau liant qui fait prise par carbonatation uniquement et non plus par prise hydraulique. Par conséquent, les émissions de CO<sub>2</sub> liées à la gravure de ce nouveau produit sont réduits de 30 pour cent, et il recapture de CO<sub>2</sub> supplémentaire pendant le processus de durcissement, soit 250 kg CO<sub>2</sub> par ton liant [91].

Ainsi, la minéralisation du dioxyde de carbone reçoit une attention accrue de secteurs comme l'industrie de minière, l'industrie de ciment, l'industrie de métal, et l'industrie de la pulpe et papier. Il prend l'avantage de la combinaison de l'atténuation des émissions de dioxyde de carbone et du bon marché à des matériaux de carbonate commerciales.

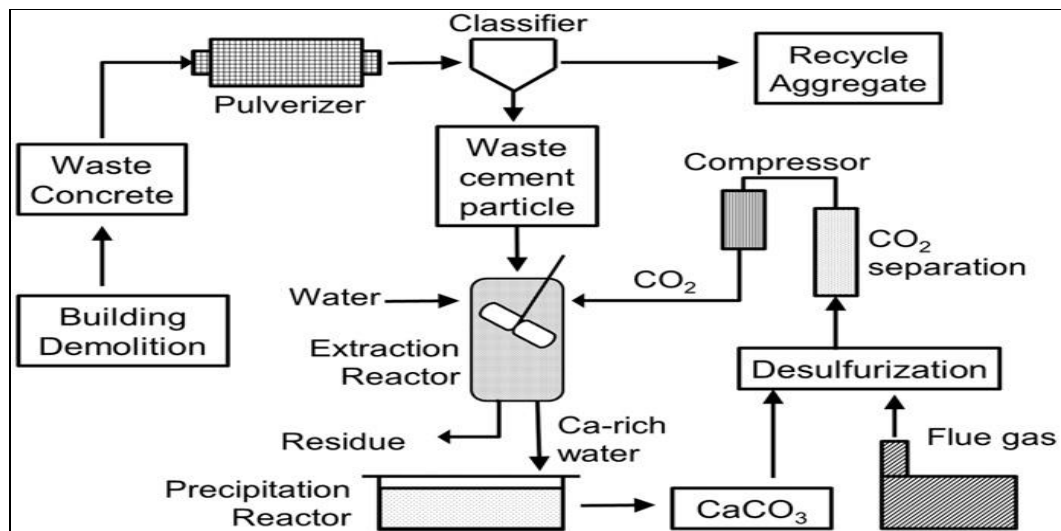


Figure 21. Diagramme de flux de processus de production de CaCO<sub>3</sub> de CO<sub>2</sub> et de ciment déchets. Le CaCO<sub>3</sub> produit peut être vendu soit en tant que réactif de haute pureté ou utilisé comme agent de désulfuration [90].

#### 2.2.2.2. Coûts liés de la technologie CCU pour la minéralisation de carbonate

Il y a de grandes différences dans les coûts estimés de différentes voies de carbonatation. Pour les technologies aqueuses directes les plus réalistes, le coût tombe dans une gamme comme illustré dans le Tableau 5. Le coût de captage de CO<sub>2</sub> à partir d'une centrale électrique est estimée dans la gamme de 45 à 100 \$US par tonne de dioxyde de carbone évitée, par exemple, en Australie, la société Calera a estimé que le coût de captage de dioxyde de carbone du gaz de combustion d'une centrale de charbon sera d'environ 45 à 60 \$US par tonne de dioxyde de carbone évitée [68].

Ainsi, dans un système complet de carbonatation minérale avec CSC, Captage et Stockage du Carbone, cela signifie que le coût total pourrait être supérieur à 105 \$US par tonne de CO<sub>2</sub> évitée.

Pour les processus qui utilisent les gaz de combustion directement et aucune captage est nécessaire, les coûts d'évitement des émissions de CO<sub>2</sub> pour la carbonatation minérale tomberont dans la gamme de 60 à 100 \$US par tonne CO<sub>2</sub> [81], par exemple, à Singapour, le coût par tonne de dioxyde de carbone évitée pourrait être estimée de l'ordre de 70,6 à 80,8 \$US [92].

Les détails sur les coûts d'exploitation et d'entretien ne sont pas disponibles au public [68].

Tableau 5. Coûts liés de technologie CCU-La minéralisation de carbonate

Coût relatif	Gamme (\$US)	Unité
Le coût de production de technologie aqueuse directe	60 à 100	par tonne de CO <sub>2</sub> évité
Carbonate de minéraux avec CCS	105 à 200	par tonne de CO <sub>2</sub> évité
Carbonate de minéraux sans CSC (par exemple utiliser des gaz de combustion directement)	60 à 100	par tonne de CO <sub>2</sub> évité

### 2.2.3. CCU-La bauxite résidu carbonatation

#### 2.2.3.1. Introduction de la technologie CCU pour la bauxite résidu carbonatation

La boue rouge, connue sous le nom fortement alcaline résidu de bauxite suspension, est un sous-produit du raffinage de la bauxite riche en alumine. La boue rouge neutralisée peut être réutilisée de plusieurs façons. Par exemple, la boue rouge neutralisée pourrait être utilisé comme agrégat pour la remise en état de la mine et de la construction, comme additif pour la fabrication de ciment, comme adsorbant pour le nettoyage des gaz industriels, comme coagulant synthétique dans le traitement des eaux usées, et comme catalyseur pour l'hydrogénation de charbon. [93] [94] [95].

Le dioxyde de carbone provenant des émissions industrielles est une matière première importante potentielle pour la neutralisation de l'acide de la boue rouge [96]. Le traitement de dioxyde de carbone dans la neutralisation de la boue rouge signifie que le dioxyde de carbone en phase gazeuse a fait barboter à travers la phase aqueuse dans la boue rouge [97].

Au Kwinana en Australie, la société Alcoa exploite une usine de gazéification de résidus, où le dioxyde de carbone gazeux à partir d'une usine d'ammoniac à proximité d'Alcoa est en contact avec sa boue rouge pour réduire le PH. L'usine a atteint sa capacité pleine depuis l'année 2007 pour traiter tous les résidus au Kwinana avec la construction d'un pipeline de transport du dioxyde de carbone à partir d'usines de l'ammoniac [98] [99].



---

Le coût du traitement du résidu neutralisé pour l'incorporation dans le ciment a été estimé à 10 € par tonne de résidu sec [95].

Tableau 6. Coûts liés de technologie CCU-La bauxite résidu carbonatation

Coût relatif/bénéfice (Industrie Alcoa)	Gamme (\$AU)	Unité
Réduction des coûts de stockage	environs 26	Par tonne CO <sub>2</sub> utilisé
Coût marginal de carbonatation	< 10	Par tonne CO <sub>2</sub> utilisé

## 2.2.4. CCU-La transformation des polymères

### 2.2.4.1. Introduction de la technologie CCU pour la transformation des polymères

Pour combiner les matières premières traditionnelles avec de dioxyde de carbone pour la synthèse de polymères est une approche nouvelle de traitement de polymère. Des études ont montré que le dioxyde de carbone en tant que solvant, qui est non toxique, ininflammable, peu coûteux et facilement disponibles avec une pureté élevée, peut offrir une alternative écologique pour la synthèse de polymères souvent avec l'amélioration des processus importants dans la sélectivité et la conversion [102] [103].

Les études examinent spécifiquement l'utilisation du dioxyde de carbone pour créer des processus et des produits qui sont plus écologiques [104] [105] [106] [107].

Le traitement de polymère nécessite le dioxyde de carbone d'une forte concentration [80]. Le dioxyde de carbone provient d'un flux de déchets, par exemple à partir de la fermentation de l'éthanol, les réformateurs, le puits de gaz naturel, le gaz de combustion provenant des centrales électriques au charbon et etc. Et le dioxyde de carbone nécessite un processus de purification avant son utilisation [68].

Le projet DREAM dirigé par Bayer consiste à prendre le dioxyde de carbone capturé à partir de la combustion d'une centrale électrique exploitée par RWE Power à Niederaußen et le transport au usine de Bayer à Leverkusen en Allemagne, où il est utilisé dans la production de polycarbonate polyol, qui est une clé bloc de construction dans la fabrication d'un matériau léger en mousse de polyuréthane. Le produit final est afin d'être utilisé dans des applications telles que la fabrication de meubles, la fabrication des pièces automobiles et dans les bâtiments et les réfrigérateurs comme un isolant [80].

L'entreprise Novomer commercialise un système de catalyseur breveté qui transforme les déchets de dioxyde de carbone en haute performance mais de faible coût polymères pour une variété d'applications. Depuis 2009, un processus pilot pour la production de matière plastique à base de dioxyde de carbone a été intégré dans l'usine de Kodak Speciality Chemicals à Rochester, États-Unis. Et pour chaque tonne de matières plastiques fabriquées de Novomer, jusqu'à une demi-tonne de CO<sub>2</sub> peut être séquestré [80] [68].

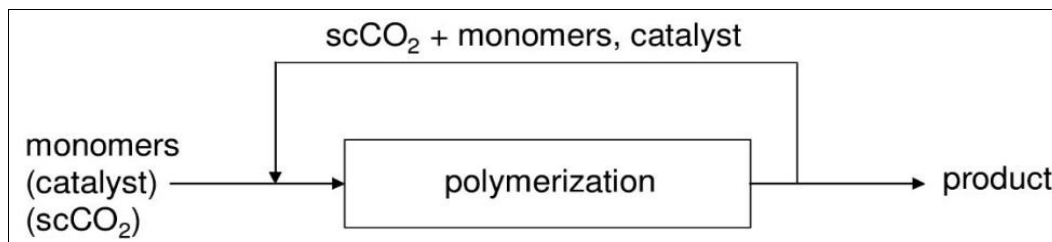


Figure 23. Vue schématique d'une polymérisation catalytique basé sur la technologie de dioxyde de carbone, dans lequel le catalyseur et les monomères peuvent être recyclés dans un processus en boucle fermée [108].

#### 2.2.4.2. Coûts liés de la technologie CCU pour la transformation des polymères

Actuellement, il n'y a pas d'informations disponibles au public sur les coûts et les besoins d'investissement pour la mise en œuvre de la technologie. Selon les rapports, les plastiques à base de dioxyde de carbone sont au moins à prix compétitif [80] [81].

Novomer a commercialisé une famille de polyols de CO<sub>2</sub>, et de ses avantages de coûts des matières premières sont considérables, que les données concernant sont illustrés dans le Tableau 7 [109]. Par exemple, le coût des matières premières de Novomer carbonate de polypropylène est d'environ 25% inférieure à celle des produits traditionnels polyols de polyéther.

Tableau 7. Coûts liés de technologie CCU-La transformation des polymères

Coût relatif (Novomer)	Gamme	Unité
Polyols coût approximatif	de 1,5 à 3,8	\$US par Kg
Le carbonate de polypropylène	< environs 25%	\$US
Le carbonate de polyéthylène	< environs 40%	\$US

#### 2.2.5. CCU-Le durcissement de béton

##### 2.2.5.1. Introduction de la technologie CCU pour le durcissement de béton

La technologie de durcissement carbonatation se concentre sur des installations de production préfabriquée en béton, où les déchets de dioxyde de carbone à partir de gaz de combustion sur place seraient utilisés et stocké de façon permanente en tant que non-réactif calcaire dans le béton [68]. Il pourrait être considéré comme une alternative au durcissement à la vapeur traditionnelle [110].

Carbon Sence Solutions du Canada est une industrie d'exemple réussi de la réutilisation du dioxyde de carbone comme matière première pour la cure du béton. Au lieu des technologies de durcissement de la vapeur d'énergie traditionnelle, le processus de durcissement de béton de Carbone Sence Solutions utilise le dioxyde de carbone des gaz de combustion pour guérir produits préfabriqués en béton. Donc, son besoin de chaleur et de vapeur est diminué. [80] [81].



Carbon Sense Solutions travaille avec les autres industries et les collectivités locales afin de démontrer et d'optimiser son processus de durcissement de béton, qui utilise le dioxyde de carbone à la place de la chaleur et de la vapeur, à l'échelle industrielle. En utilisant le dioxyde de carbone de la concentration élevée, le processus est accéléré. Le schéma principal est présenté dans la Figure 24. Environ 120 kilogrammes de dioxyde de carbone peut être réduit par tonne de béton préfabriqué.

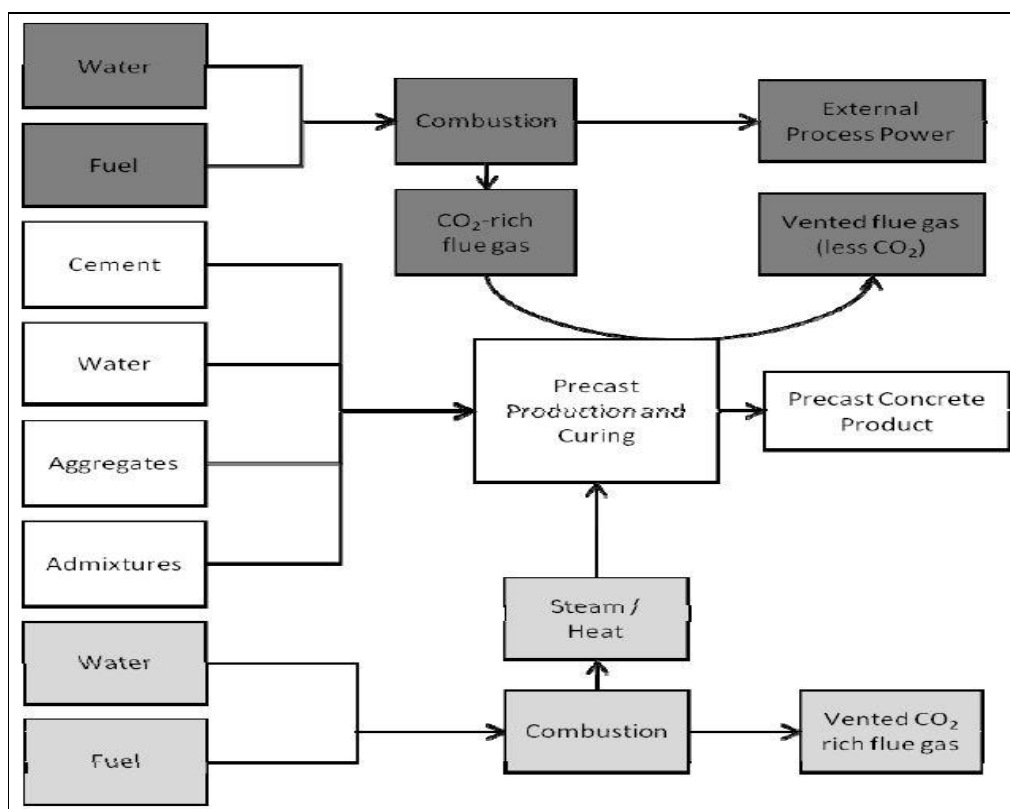


Figure 24. Diagrammes de blocs de Carbon Sence Solutions Inc du processus de durcissement de béton de CO2 accélérée (en haut, éclos) et le processus de durcissement à la vapeur conventionnelle (en bas, foncé). Les deux processus partagent le processus de production de béton commune (au milieu, pas de remplissage) [110].

#### 2.2.5.2. Coûts liés de la technologie CCU pour le durcissement de béton

Le coût de la technologie sera sensitif aux coûts relatifs de captage du dioxyde de carbone et ceux des matériaux nécessaires pour les méthodes alternatives de durcissement [80].

Actuellement, la récupération de dioxyde de carbone coûte environ 150 à 165 \$US par tonne. A ce prix, le coût de dioxyde de carbone nécessaire pour le durcissement est détaillé dans la Tableau 8, avec le bloc de maçonnerie est de la taille de 200 x 200 x 400 mm.

Bien que la production de vapeur pour guérir coûte actuellement environ 0,02 \$US par bloc, il est prévu que le coût relatif de CO<sub>2</sub> va diminuer [68].

Tableau 8. Coûts liés de technologie CCU-Le durcissement de béton

Coût relatif	Gamme	Unité
Coût de récupération de dioxyde de carbone	de 150 à 165	\$US par tonne CO <sub>2</sub>
Coût d'un dioxyde de carbone nécessaire pour le durcissement	environs 0,08	\$US par bloc de maçonnerie
Coût de production de vapeur pour durcir	environs 0,02	\$US par bloc de maçonnerie

## 2.2.6. CCU-La production de carburant liquide

### 2.2.6.1. Introduction de la technologie CCU pour la production de carburant liquide

Le dioxyde de carbone en tant que matière première pour la production de carburant liquide est une vaste catégorie, qui comprend la conversion du dioxyde de carbone aux produits combustibles de substitution, notamment l'acide formique, méthanol, diméthyle-éther, de l'éthanol et d'autres produits pétroliers équivalents [111] [112].

Le méthanol et l'acide formique ont été largement ciblés en tant que produits et ils sont formés par l'hydrogénation du dioxyde de carbone avec une large gamme de catalyseurs [81]. Un examen complet du dioxyde de carbone comme matière première de la synthèse d'acide formique se trouve dans la littérature [113] et également celui de la synthèse du méthanol [114].

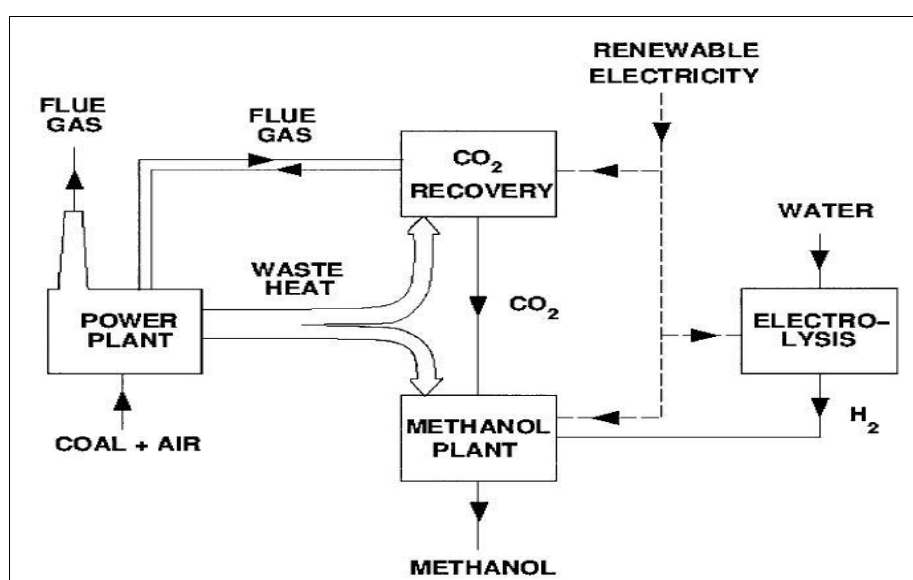


Figure 25. Utilisation de la chaleur des déchets et de l'électricité renouvelable pour produire du méthanol à partir de combustion de dioxyde de carbone de gaz [114].

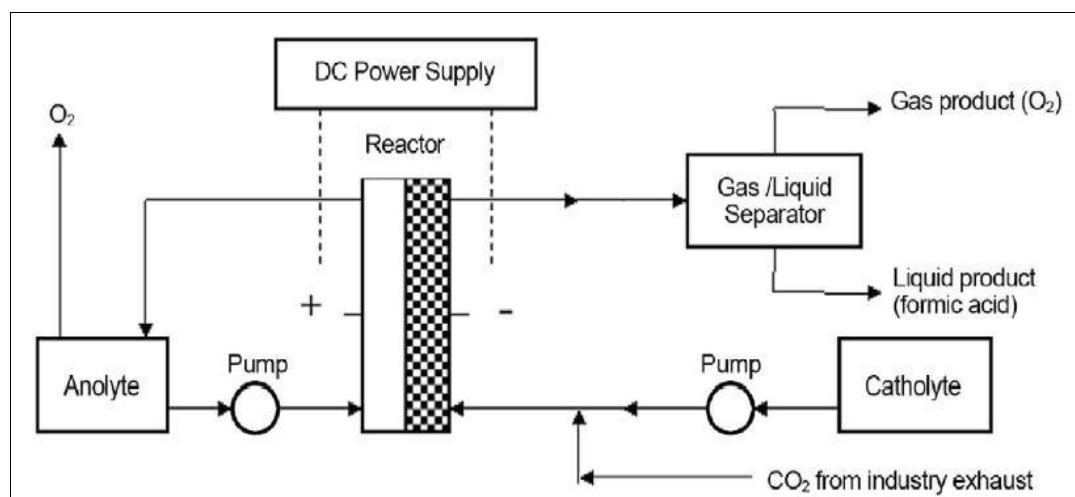


Figure 26. Schéma de principe de l'ERC de la technologie (électro-réduction de dioxyde de carbone) pour l'acide formique. [115]

### 2.2.6.2. Coûts liés de la technologie CCU pour la production de carburant liquide

Les coûts et les prix relatifs à cette technologie ne sont pas disponibles au public. En général, le prix sera sensible à l'offre, la demande et le prix du pétrole d'autres carburants alternatifs [68]. Selon la technologie de l'industrie Mantra, 8 MWh d'énergie électrique est nécessaire dans la production de l'acide formique par tonne de dioxyde de carbone consommé. L'acide formique a actuellement une valeur de marché de l'ordre de 1440 US\$ par tonne, comme indiqué dans le Tableau 9.

Tableau 9. Coûts liés de technologie CCU-La production de carburant liquide

Coût relatif	Gamme	Unité
Apport d'énergie électrique	environs 8	MWh par tonne CO2
valeur de marché de l'acide formique	Environs 1440	\$US par tonne acide formique

### 2.2.7. CCU-Le rendement de l'urée stimulé

#### 2.2.7.1. Introduction de la technologie CCU pour le rendement d'urée stimulé

L'urée représente près de 50% de la production d'engrais azotés du monde. Il est produit par la combinaison d'ammoniac et de dioxyde de carbone à pression élevée et température élevée, et son procédé de synthèse est montré sur la Figure 27.

L'utilisation de la technologie de captage de dioxyde de carbone de gaz de combustion dans les usines d'urée est relativement nouvelle, introduite à la fin des années 1990. Dans les usines de production d'urée de Mitsubishi Heavy Industries, la technologie de captage de dioxyde de carbone ont été intégrés au cours des dernières années. [116]. Mitsubishi Heavy Industries possède plusieurs unités opérationnelles qui peuvent capturer entre 100 et 400 tonnes de dioxyde de carbone par jour.

Le système de Mitsubishi Heavy Industries utilise une approche de postcombustion pour capturer le dioxyde de carbone des gaz de combustion produits par la combustion de gaz naturel dans une usine chimique [117]. Le dioxyde de carbone récupéré, qui est de la concentration de 99,9%, est réutilisé comme matière première pour la production de l'urée pour augmenter efficacement la capacité de production.

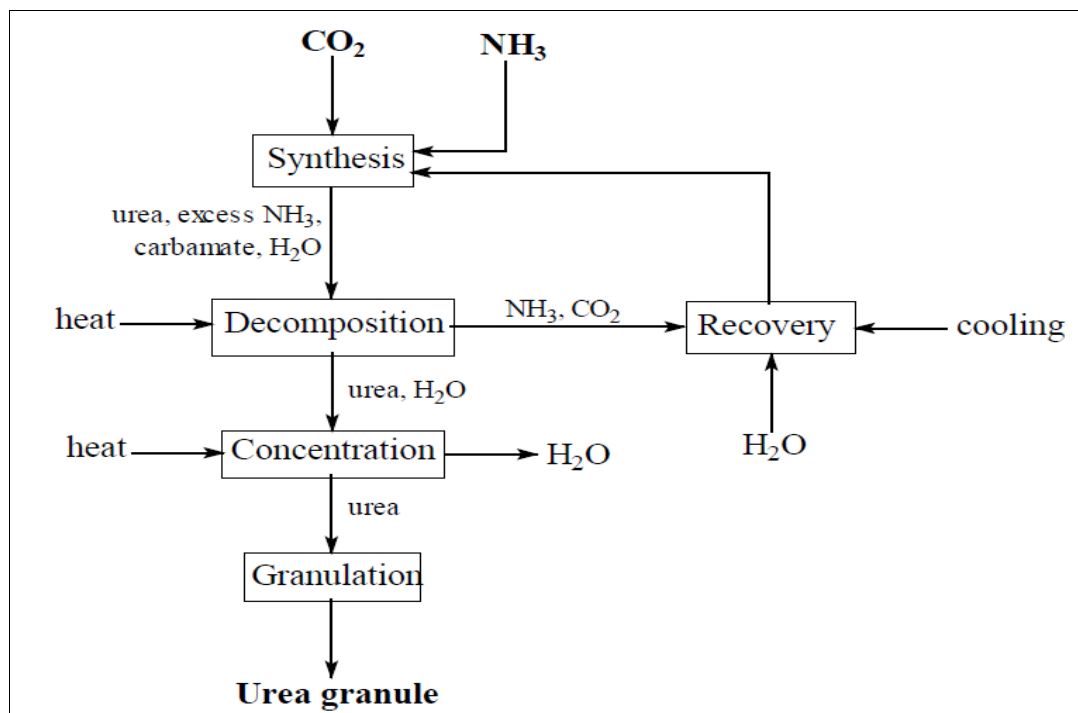


Figure 27. Représentation schématique de la synthèse de l'urée [118].

#### 2.2.7.2. Coûts liés de la technologie CCU pour le rendement d'urée stimulé

Le coût d'achat de dioxyde de carbone provenant de la source et le coût de captage sur place à proximité pourrait être aussi bas que 10 à 20 \$US par tonne de dioxyde de carbone [80].

Selon le projet de Mitsubishi Heavy Industries, pour la construction d'une usine d'ammoniac de 2000 tonnes par jour et une usine d'urée de 3,500 tonne par jour, où le dioxyde de carbone des gaz de combustion émis durant le processus de production d'engrais d'urée est utilisé comme matière première pour la synthèse de l'urée, la valeur correspondante est estimée à coûter entre 1,2 et 1,5 milliard US\$. [68].

Les détails et les précisions sur les coûts de captage et d'exploitation de carbone ne sont pas toujours disponibles.

Tableau 10. Coûts liés de technologie CCU-Le rendement de l'urée stimulé [80].

Coût relatif/prix	Gamme	Unité
Prix de marché de l'urée	225 à 290	\$US par tonne d'urée
Coûts d'achat de dioxyde de carbone	10 à 20	\$US par tonne de CO <sub>2</sub>

### 2.2.8. Résumé de la technologie CCU

La technologie CCU peut favoriser la réutilisation industrielle CO<sub>2</sub> pour réduire la pollution par les gaz à effet de serre et créer les bénéfices économiques simultanément. Pour les parcs éco-industriels, CCU est la clé pour créer des réseaux d'utilisation de CO<sub>2</sub> qui pourrait améliorer considérablement les performances d'un parc éco-industriel. Les options différentes de CCU sont résumées dans le Tableau 11.

Tableau 11. Résumé d'utilisations différentes de la technologie CCU [80] [68] [81]

Utilisation	Source	Produit	Industrie d'exemple	Quantité de CO <sub>2</sub> utilisé par unité de produit
La culture d'algues	CO <sub>2</sub> de qualité alimentaire	Algue biomasse	Algenol, Solazyme, MDB Energy, Aurora Algae, Algae Tec.	1,8 à 2 tonne CO <sub>2</sub> utilisé par tonne d'algues biomasse séchées produite
La minéralisation de carbonate	CO <sub>2</sub> à concentration relativement faible, de qualité industrielle.	Un matériau à base de ciment et agrégat supplémentaire, minéralisé CO <sub>2</sub> .	Calera, Calix, Skyonic Corporation, Lafarge.	Environ 0,5t de CO <sub>2</sub> par tonne de carbonate minéral produit
La bauxite résidu carbonatation	CO <sub>2</sub> d'une concentration au-dessus de 85%, de qualité industrielle.	L'alcalinité neutralisé / boue rouge	Alcoa	30 à 35 Kg de CO <sub>2</sub> par tonne de boue rouge
La transformation des polymères	CO <sub>2</sub> de forte concentration, viens de flux de déchets.	Polymère des sacs en plastique, des stratifiés, des revêtements, des agents tensio-actifs pour EOR, les composants automobiles et médicaux	Bayer, Novomer, BASF, Siemens.	Jusqu'à demi tonne de CO <sub>2</sub> utilisé par tonne de produit fabriqué

Le durcissement de béton	Captage viens de sources industrielles	Produits préfabriqués	Carbon Sence Solutions Inc, Novacem, TecEco, C-Fix, Calix, Calera.	Jusqu'à 120 Kg de CO <sub>2</sub> séquestré par tonne de béton préfabriqué
La production de carburant liquide	Les gaz de combustion viennent des centrales électriques et d'autres sources	Méthanol, acide formique, etc.	Carbon Recycling International, Mantra Venture Group.	Environ 3,1 tonnes de CO <sub>2</sub> utilisées par tonne de combustible liquide, sous certaines hypothèses.
Le rendement de l'urée stimulé	CO <sub>2</sub> capturé sur place à partir de gaz de combustion réformateur	Urée	Mitsubishi Heavy Industries	Pour chaque tonne d'urée produite, 0,735 à 0,75 tonne de CO <sub>2</sub> sera typiquement consommé.

---

---

---

---

## **Chapitre3. Résumé de la méthode du Branch-and-Cut.**



---

---

---

---

Dans ce chapitre nous allons présenter la méthode « Branch and Cut » appliquée à la résolution des modèles développés dans cette thèse. L'algorithme du «Branch and Cut» est une méthode qui conjugue les efforts de l'algorithme de séparation et évaluation (Branch-and-Bound) et la méthode de coupes polyédrales (Cutting-Plane). Ainsi, pour résoudre un programme linéaire en nombres entiers ou partiellement entiers, la méthode du Branch-and-Cut commence par résoudre une relaxation du problème puis elle applique la méthode des coupes polyédrales (Cutting-Plane) sur la solution trouvée. Si celle-ci n'arrive pas à obtenir une solution entière ou partiellement entière, alors le problème est divisé en plusieurs sous-problèmes qui seront résolus de la même façon.

Une telle approche a été utilisée pour la première fois pour résoudre le problème de « Linear Ordering » par Grötschel, Junger et Reinelt. Le terme « Branch and Cut » a été introduit par Padberg et Rinaldi en 1987 pour résoudre un problème de voyageur de commerce puis généralisé pour une résolution efficace de programmes linéaires en nombres entiers.

La méthode de Branch and Cut est considérée comme une amélioration efficace de la méthode du Branch-and-Bound (méthode de Branch and Bound avec génération dynamique de contraintes) pour résoudre les problèmes linéaires en nombres entiers ou mixtes (partiellement entiers) de grandes dimensions. Le nombre d'itérations dans Branch-and-Bound augmente de façon exponentielle avec le nombre de variables et dans la plupart de cas elle n'arrive pas à résoudre un programme linéaire en nombres entiers de grande taille.

### **3.1. La méthode du Branch-and-Bound**

Plusieurs problèmes d'optimisation combinatoire se formulent sous la forme d'un programme linéaire en nombres entiers (PLNE) ou sous la forme d'un programme linéaire mixte en nombres entiers (PLMNE). Une grande partie de ces problèmes appartient à la classe des problèmes NP-difficiles. L'algorithme de séparation et évaluation, plus connu sous son appellation anglaise Branch and Bound (B&B), utilisé pour résoudre d'une façon exacte des problèmes de ces types, repose sur une méthode arborescente de recherche d'une solution optimale par séparations et évaluations, en représentant les états solutions par un arbre d'états, avec des nœuds, et des feuilles [119].

Le Branch-and-Bound est basé sur trois axes principaux :

- La séparation, qui consiste à diviser un ensemble de solutions en sous-ensembles.
- L'évaluation, qui consiste à borner ou minorer les solutions et à éliminer les sous-ensembles ne contenant pas la solution optimale.

- 
- La stratégie de parcours.

Dans le cas des PLNE ou PLMNE, la méthode du Branch and Bound commence par résoudre la relaxation linéaire du programme linéaire, c'est à dire en enlevant les conditions d'intégralité sur les variables. Cette évaluation est toujours inférieure à la valeur de la solution optimale du PLNE ou PLMNE, puisque toute solution du PLNE ou PLMNE est une solution de la relaxation linéaire. Par conséquent si la solution optimale de la relaxation linéaire est entière ou partiellement entière, alors c'est une solution optimale du PLNE ou PLMNE. Sinon on effectue une opération de branchement en choisissant une variable  $x_i$  non entière dans la solution optimale du programme linéaire que l'on a résolu. L'ensemble des solutions se divise alors en deux sous-ensembles, celle pour laquelle  $x_i \leq [x_i]$  et celle pour laquelle  $x_i \geq [x_i] + 1$ , où  $[x_i]$  est la partie entière de  $x_i$ . On évalue ensuite les nouveaux nœuds et éventuellement on élague ceux qui sont inutiles.

Précisément, l'évaluation permet de réduire l'espace de recherche en éliminant quelques sous-ensembles qui ne contiennent pas la solution optimale. L'objectif est d'essayer d'évaluer l'intérêt de l'exploration d'un sous-ensemble de l'arborescence. Le Branch-and-Bound utilise une élimination de branches dans l'arborescence de recherche de la manière suivante : la recherche d'une solution de coût minimal, consiste à mémoriser la solution de plus bas coût rencontré pendant l'exploration, et à comparer le coût de chaque nœud parcouru à celui de la meilleure solution. Si le coût du nœud considéré est supérieur au meilleur coût, on arrête l'exploration de la branche et toutes les solutions de cette branche seront nécessairement de coût plus élevé que la meilleure solution déjà trouvée.

La séparation consiste à diviser le problème en sous-problèmes. Ainsi, en résolvant tous les sous-problèmes et en gardant la meilleure solution trouvée, on est assuré d'avoir résolu le problème initial. Cela revient à construire un arbre permettant d'énumérer toutes les solutions. L'ensemble de nœuds de l'arbre qu'il reste encore à parcourir comme étant susceptibles de contenir une solution optimale, c'est-à-dire encore à diviser, est appelé ensemble des nœuds actifs.

La stratégie de parcours comporte trois types différents :

- La largeur d'abord : Cette stratégie favorise les sommets les plus proches de la racine en faisant moins de séparations du problème initial. Elle est moins efficace que les deux autres stratégies présentées.
- La profondeur d'abord : Cette stratégie avantage les sommets les plus éloignés de la racine (de profondeur la plus élevée) en appliquant plus de séparations au problème initial. Cette voie mène rapidement à une solution optimale en économisant la mémoire.

- 
- Le meilleur d'abord : Cette stratégie consiste à explorer des sous problèmes possédant la meilleure borne. Elle permet aussi d'éviter l'exploration de tous les sous-problèmes qui possèdent une mauvaise évaluation par rapport à la valeur optimale.

Un nœud peut être élagué dans trois cas possibles:

- Le programme linéaire n'est pas réalisable.
- La valeur de la solution est supérieure à la valeur de la meilleure solution réalisable trouvée, dans ce cas il est inutile de continuer la recherche dans la sous-arborescence enracinée en ce nœud, puisque les bornes inférieures obtenues sont strictement croissantes suivant la profondeur de l'arbre du Branch and Bound.
- La solution est entière ou partiellement entière, donc réalisable.

L'algorithme s'arrête quand on n'a plus de nœud à évaluer.

### 3.2. La méthode du Cutting-Plane

La méthode de coupes polyédrales, plus connue sous son appellation anglaise Cutting-Plane, a été développée par A. Schrijver [120], elle est destinée à résoudre des problèmes d'optimisation combinatoire.

La description sous la forme d'un programme linéaire d'un problème d'optimisation combinatoire (P) peut être trop grande pour être représentée explicitement en mémoire ou pour tenir dans un solveur de programmes linéaires. Pour cela, quand les problèmes d'optimisation combinatoire sont de grande taille on utilise une technique qui consiste à enlever une partie de ses contraintes et de résoudre le problème relaxé.

Le problème d'optimisation, qu'on nommera (P) et l'ensemble des solutions réalisables du problème relaxé, qu'on nommera R, contient celui de (P). Ainsi, pour un problème de minimisation la valeur de la fonction économique d'une solution optimale de R est inférieure ou égale à celle d'une solution optimale de (P). La solution optimale de programmation linéaire est contenue dans l'ensemble de solutions réalisables de cette relaxation. Pour un problème de minimisation la valeur de la fonction objective d'une solution optimale du problème relaxé est inférieure ou égale à celle de la solution optimale donnée par le problème. Donc, cette méthode consiste à résoudre un problème relaxé, et à ajouter itérativement des contraintes du problème initial (P) pour trouver à la fin la solution optimale de (P).

La méthode des coupes polyédrales est peu performante mais sa performance est améliorée lorsqu'elle est combinée avec la méthode du Branch-and-Bound.

---

### 3.3. La méthode du Branch-and-Cut

#### 3.3.1. Algorithme général du Branch-and-Cut

Pour résoudre un programme linéaire en nombres entiers ou partiellement entiers (mixte), la méthode Branch-and-Cut, basée sur la méthode du Branch-and-Bound, commence d'abord par relaxer le problème puis appliquer la méthode du Cutting-Plane sur la solution trouvée. Si on n'obtient pas une solution entière alors le problème sera divisé en plusieurs sous-problèmes qui seront résolus de la même manière. Considérons un problème d'optimisation ( $P$ ) :

$$\begin{aligned} & \min c^t x \\ (P) \quad & Ax \leq b, \quad x \in N^n, \\ & \text{avec } A \in R^{m \times n} \text{ et } b \in R^m. \end{aligned}$$

La description générale d'un algorithme de Branch-and-Cut peut se traduire par les quatre étapes suivantes :

- Etape 1. Initialisation :  
On initialise la liste des problèmes à l'ensemble vide :  $L = \emptyset$ . Initialiser le programme linéaire par le sous problème de contraintes  $(A_1, b_1)$  avec  $A_1 \in R^{p \times n}$  et  $b_1 \in R^p$  avec  $p < m$ .
- Etape 2. Etapes d'évaluation d'un problème :  
On détermine  $x^1$  la solution optimale du problème ( $P^1$ ) :  
 $\text{Min}\{c^t x : A_1 x \leq b_1, x \in N^n\}$ , puis on applique la méthode des coupes polyédrales sur le problème relaxé pour obtenir la solution courante.
- Etape 3. Mise à jour de la liste des problèmes  
Si la solution courante est réalisable alors  $x^* = x^1$  est la solution du problème ( $P$ ) et on s'arrête, sinon on ajoute le problème ( $P^1$ ) à la liste des problèmes.

- 
- Etape 4. Sélection de problème:

**Tant que  $L \neq \emptyset$  faire**

- On sélectionne un problème de  $L$ .
- On branche le problème en deux ou plusieurs sous problèmes.
- On résout les nouveaux sous problèmes en appliquant les « Étapes d'évaluation » (étape 2) et on met à jour la liste  $L$  (étape 3).

**Fin Tant que**

### 3.3.2. Les différences entre la méthode du Branch-and-Bound et la méthode Branch-and-Cut

La méthode du Branch-and-Cut peut être considérée comme une généralisation de la méthode du Branch-and-Bound. Fondamentalement, il se base sur le même cadre que Branch-and-Bound avec des coupes polyédrales supplémentaires générées et imposées sur chaque nœud de l'arbre de Branch-and-Bound, antérieur à l'élagage et le branchement.

Bien que les deux méthodes soient adaptées pour résoudre une série de problèmes relaxés de la programmation linéaire à différents nœuds, leurs philosophies de solutions sont différentes. La méthode du Branch-and-Bound applique deux coupes simples à chaque nœud et prend avantage de l'optimisation rapide de la programmation linéaire à chaque nœud. La philosophie de la méthode Branch-and-Cut est de faire autant de travail que nécessaire pour obtenir une borne serrée au niveau du nœud avant l'élagage et le branchement [121]. Le travail à chaque nœud peut comprendre la génération des coupes fortes de plane, l'amélioration de formulations, le prétraitement de problème, et l'application d'une heuristique primale.

Dans la pratique, de nombreuses coupes de plane peuvent être ajoutées à chaque nœud, ce qui peut ralentir la ré-optimisation. Pour un problème donné de grande dimension, une enquête empirique est généralement utilisée pour déterminer le nombre de coupes qui s'impose à la racine et d'autres nœuds.

De plus, la méthode du Branch-and-Bound ne convient pas pour les problèmes de grande taille. Parce que le nombre d'itérations dans Branch-and-Bound augmente de façon exponentielle avec le nombre de variables ce qui entraîne une impossibilité de résolution ou une résolution trop lente.

### 3.3.3. La méthode du Branch-and-Cut dans CPLEX

La méthode du Branch-and-Cut est utilisée dans CPLEX, précisément dans le solveur MIP, pour résoudre les problèmes d'optimisation en nombres entiers ou partiellement entiers. L'algorithme du Branch-and-Cut dans CPLEX est présenté suivant :

- 
- Etape 1. Le prétraitement et le sondage de problème, qui consiste à réduire la taille de problème et à améliorer la formulation de problème.

Les techniques utilisées dans CPLEX pour le prétraitement de problème sont (en anglais) : « identification of infeasibility », « identification of redundancy », « improve bounds » et « rounding ». Les techniques utilisées dans CPLEX pour le sondage de problème sont (en anglais) : « fixing variables », « improve coefficients » et « logical implications ». Les détails de chaque technique sont bien développés dans la littérature [122] [123] [124] [125].

- Etape 2. La résolution de la relaxation du problème initial en utilisant les méthodes de programmation linéaire disponibles dans CPLEX, par exemple la méthode du Simplexe, version Primale ou version Duale.
- Etape 3. La vérification, qui consiste à vérifier si toutes les variables entières ont vraiment des valeurs entières. Si oui, on met à jour la valeur d'objective actuelle et on passe à l'étape 7. Sinon, on passe à l'étape 4.
- Etape 4. L'ajout de coupes planes, qui comporte neuf techniques de coupes disponibles dans CPLEX (en anglais) : « knapsack covers », « generalized upper bound covers », « flow covers », « cliques », « implied bounds », « gomory mixed integer cuts », « mixed integer rounding », « disjunction », et « flow path ». Les détails de chaque technique sont bien développés dans la littérature [126] [121] [122].
- Etape 5. L'application d'une méthode heuristique, qui comporte deux types d'heuristiques disponibles dans CPLEX (en anglais) : « node heuristics » et « neighborhood exploration ».

Les techniques disponibles pour le « neighborhood exploration » sont (en anglais) : « local branching », « relaxation induced neighborhood search », « guided dives » et « evolutionary algorithms for polishing MIP solutions ». Les détails de chaque technique peuvent être trouvés dans la littérature [127] [128] [129] [130] [131].

- Etape 6. Le choix d'une variable entière et la création deux sous-problèmes.
- Etape 7. La sélection d'un sous-problème à résoudre, ensuite passez à l'étape 2.

---

# **Chapitre4. Modélisation d'un parc éco-industriel, modèle I.**



---

---

---

---

## 4.1. Modélisation du coût de transport du dioxyde de carbone

Les quatre moyens de transport du dioxyde de carbone sont pipeline, ferroviaire, navire maritime et routier. En raison de la limite de rayon court du parc éco-industriel, les deux principaux moyens pour transporter le dioxyde de carbone sont pipeline et transporteur routier. Le pipeline est un moyen continu de transport et les quatre tailles standards des pipelines sont illustrées en la Figure 28. Le transporteur routier est un moyen discret. En outre, la question des transports devient très importante pour encourager l'établissement d'un réseau performant d'un parc éco-industriel.

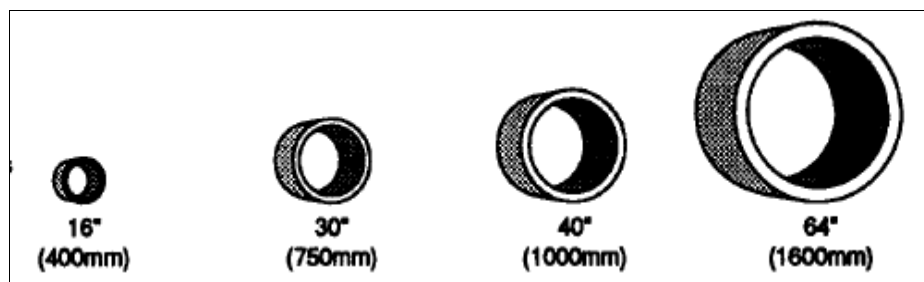


Figure 28. Illustration des pipelines onshores en tailles standards différents [132].

### 4.1.1. Modélisation du coût de transport du dioxyde de carbone en transporteur routier

Le transport du dioxyde de carbone avec un camion-citerne est une modalité flexible [133]. Le dioxyde de carbone à transporter par un camion est souvent en phase adsorbée ou en phase liquide, et le coût unitaire net de transport du dioxyde de carbone en camion est quasiment linéaire, proportionnel à la distance, et il est généralement entre 0,17 et 0,4 \$US par tonne CO<sub>2</sub> transporté par kilomètre [134]. Cette option montre son avantage pour la courte distance et pour la quantité moins considérable.

Bien que, en réalité, des pratiques de transporter CO<sub>2</sub> en transporteur routier existent vraiment, elles ne sont pas souvent évoquées ni apparues dans les travaux de recherche. Ses données sont rarement évoquées dans la littérature.

Par hypothèse, nous supposons que le camion sera vide en retour de transport. Nous proposons que le coût de transport du CO<sub>2</sub> puisse être composé de trois parties:

- Le coût de carburant consommé durant le transport sans charge.
- Le coût de carburant consommé durant le transport avec charge.
- Le coût fixe, y compris le coût de matériel, de load-unload, d'investissements de transport, d'exploitation, et de l'entretien et la maintenance.

#### 4.1.1.1. Le coût fixe de transport du dioxyde de carbone en transporteur routier

Nous supposons que la partie de coût fixe ( $CF_{routier}$ ) est linéaire proportionnelle à la distance de transport, soit :

$$CF_{routier} = coef\_a \times distance + coef\_b. \quad \text{Équation 1}$$

D'après les scénarios de transport du CO<sub>2</sub> réalisés en camion-citerne pour des différentes distances et dans les phases différentes [134], les données de coût total de transport et de contribution de carburant consommé sont résumées et illustrées dans le Tableau 12. Les distances sont de 150km, de 200km et de 300km. Le dioxyde de carbone est en phase adsorbée en matériel de type 1, de type 2, et en phase liquide. Les propriétés physiques détaillées des matériels de type 1 et de type 2 sont bien présentées dans les travaux de recherche de [134].

Tableau 12. Le transport du CO<sub>2</sub> en camion pour une distance entre 150km et 300km. (Data source: [134]).

Phase de transport	Coût total de transport du CO <sub>2</sub> (\$US/tCO <sub>2</sub> )	Contribution du carburant dans le coût total de transport
Phase adsorbée du type 1	32-44	25%-33%
Phase adsorbée du type 2	34-48	38%-48%
Phase liquide (-50°C, 0,7MPa)	25-30	17%-24%

D'après le Tableau 12, le coût carburant consommé peut être calculé en utilisant son contribution, et de plus, le coût fixe de transport en camion-citerne est obtenu et illustré dans le Tableau 13.

Tableau 13. Coût carburant consommé et coût fixe de transport du CO<sub>2</sub> en camion pour une distance entre 150km et 300km.

Phase de transport	Coût carburant consommé (\$US/tCO <sub>2</sub> )	Coût fixe de transport CO <sub>2</sub> (\$US/tCO <sub>2</sub> )
Phase adsorbée du type 1	8-14,52	24-29,48
Phase adsorbée du type 2	12,92-23,04	21,08-24,96
Phase liquide	4,25-7,2	20,75-22,8

En se basant sur les données obtenues dans le Tableau 13, les coefficients d'équation 1 sont déterminés et illustrés dans le Tableau 14 pour le transport dans les différentes phases.

Tableau 14. Les coefficients déterminés pour le coût fixe de transport du CO<sub>2</sub>.

Phase de transport	Coefficient coef_a	Coefficient coef_b
Phase adsorbée du type 1	-0,098	38,74
Phase adsorbée du type 2	-0,083	33,56
Phase liquide	-0,076	32,15

#### 4.1.1.2. Le coût du carburant consommé durant le transport sans charge en transporteur routier

Pour la partie de coût carburant consommée durant le transport ( $CC_{routier}$ ), nous supposons qu'il est déterminé par la distance en km, la vitesse en km/h, le prix unitaire de carburant en €/gal et le carburant consommé de camion sans charge par heure ( $cphsc$ ) en gal/h. Le carburant consommé de camion par heure est un paramètre fixé dépendant du type de camion utilisé [135], par exemple, un camion du type lourd moyen consomme d'environ 0,83 gal de carburant par heure.

Nous proposons que le coût carburant consommé durant le transport sans charge ( $CC_{routier}$ ) est d'expression linéaire, soit :

$$CC_{routier} = \frac{\text{distance}}{\text{vitesse}} \times cphsc \times \text{prixcarburant} \quad \text{Équation 2}$$

Tableau 15. Le carburant consommé par heure sans charge ( $cphsc$ ) selon le type de camions. (Data source : [135])

Type Camion (en Anglais)	Type Camion (en Français)	Carburant consommé par heure sans charge (gal/heure)
Compact sedan	Berline compacte	Environs 0,17
large sedan	Grande berline	Environs 0,39
Medium heavy truck	Camion de lourd moyen	Environs 0,83
Delivery truck	Camion de livraison	Environs 0,83
Tow Truck	Dépanneuse	Environs 0,59
Combination truck	Camion de combinaison	Environs 0,49
Bucket truck	Camion nacelle	Environs 0,89
Tractor semi-trailer	Tracteur demi-remorque	Environs 0,63

#### 4.1.1.3. Le coût du carburant consommé durant le transport avec charge en transporteur routier

Nous pouvons supposer que le coût de carburant avec charge ( $CQ_{routier}$ ) est déterminé par la distance en km, la vitesse en km/h, le prix unitaire de carburant en €/gal et le carburant consommé de camion par heure avec charge ( $cphac$ ) en gal/h.

Dans la littérature, le carburant consommé de camion par heure avec charge ( $cphac$ ) a été rarement évoqué. Selon les données des sites commerciaux, le poids d'un

camion-citerne équipé est normalement entre 26 et 33 tonnes et la capacité de transport de CO<sub>2</sub> est généralement entre 15 et 20 tonnes. Donc, la proportion entre le poids d'un camion-citerne équipé et sa capacité de transport est environ 0,6.

Donc, pour simplifier la modélisation, nous supposons que le carburant consommé de camion par heure avec charge (*cphac*) dépend du rapport de la quantité transporté et le poids de camion utilisé et le carburant consommé durant le transport sans charge (*cphsc*). Et le rapport est souvent pris la valeur d'environ 0,6 si le camion-citerne est plein chargé.

$$cphac = \frac{QuantiteTransport}{poids\ camion} \times cphsc \quad \text{Équation 3}$$

$$CQ\_routier = \frac{distance}{vitesse} \times cphac \times prix\ carburant \quad \text{Équation 4}$$

#### 4.1.1.4. L'expression du coût de transport du dioxyde de carbone en transporteur routier

Nous avons déjà mentionné que le coût total de transport (*CTT\_routier*) de CO<sub>2</sub> est composé de trois parties : le coût fixe (*CF\_routier*), le coût de carburant sans charge (*CC\_routier*) et le coût de carburant avec charge (*CQ\_routier*). Le camion-citerne est illustré dans la Figure 29.

$$CTT\_routier = CF\_routier + CC\_routier + CQ\_routier \quad \text{Équation 5}$$

D'après les équations 1-5, l'expression précise de coût de transport du dioxyde de carbone en camion-citerne, qui est d'aller chargé QT tonne CO<sub>2</sub> et de retour vide, peut s'écrire comme :

$$CTT\_routier = coef\_a \times d + coef\_b + \frac{d}{v} \times \left(1 + \frac{QT}{pc}\right) \times cphsc \times prixC \quad \text{Équation 6}$$



Figure 29. Illustration d'un camion-citerne (source : [www.group-maisonneuve.com](http://www.group-maisonneuve.com)).

#### 4.1.2. Modélisation du coût de transport du dioxyde de carbone en pipeline

La première expérience de transport du dioxyde de carbone par pipeline a été réalisée dans le projet Canyon Reef, exploité depuis 1972 aux États-Unis pour la technologie EOR-Enhanced Oil Recovery. Les détails des projets de transport du dioxyde de carbone en pipeline sont présentés dans le Tableau 16.

Tableau 16. Projets de transport du CO<sub>2</sub> en pipeline (data source : [136] [137])

Pipeline projet	Location	Date d'opération	Longueur (en km)
Snohvit	Norvège	2008	153
In Salah	Algérie	2004	14
Bati Raman	Turquie	1983	80,5
Reconcavo	Brésil	1987	183
Lacq	France	2010	27
Cortez	États-Unis	1984	808
Bravo	États-Unis	1984	350
Canyon Reef Carriers	États-Unis	1972	225
Val Verde	États-Unis	1998	130
Weyburn	Canada et États-Unis	2000	328

La recherche sur la modélisation des coûts et de la conception de transport du CO<sub>2</sub> par pipeline a été largement développée dans les travaux de recherche suivants : [132] [138] [139] [140] [62] [71] [63] [141] [142].

Pour le pipeline de longueur considérable, les stations de pompage sont nécessaires chaque 250 kilomètres selon la littérature. Dans notre cas, pour un parc éco-industriel, la distance est limitée et courte, les stations de pompage le long du pipeline peuvent être ignorés. Les stations de pompes installés dans l'usine de captage du CO<sub>2</sub> doivent être prises en compte pour la modélisation de coût de transport, bien sûr si elles existent. Les pipelines de projet CSC à Lacq sont illustrés dans la Figure 30.



Figure 30. Pipeline utilisé de projet CSC à Lacq, France. (Source : [www.total.com](http://www.total.com))

---

#### 4.1.2.1. Modélisation du coût d'investissement et coût d'opération et maintenance d'un pipeline onshore de transport du dioxyde de carbone

Dans les travaux de recherche développés dans [62], les modèles de coût d'investissement d'un pipeline CO<sub>2</sub> ( $CI_{pipeline}$ ) sont résumés et catalogués en cinq types :

- Modèles linéaires.
- Modèles basés sur le poids de pipeline.
- Modèles quadratiques.
- Modèles Universitaires CMU-Carnegie Mellon.
- Modèles basés sur le débit de flux CO<sub>2</sub> à transporter.

Le modèle du dernier type, les modèles basés sur le débit de flux CO<sub>2</sub> à transporter, est choisi et intégré dans notre modélisation d'un parc éco-industriel, grâce à sa simplicité. Son expression [143] dépend de débit de flux CO<sub>2</sub> en kg/s, noté  $m$ , et la longueur de pipeline en km, noté comme  $long_{pipe}$ , soit:

$$CI_{pipeline} = 24,7 \times m^{0,35} \times long_{pipe}^{1,13} \quad \text{Équation 7}$$

Dans la littérature, les coûts annuels d'opération et maintenance pour les pipelines ( $COM_{pipeline}$ ) sont généralement exprimés sous forme de pourcentage de 1,5 à 4% des coûts d'investissement, et son expression est la suivante :

$$COM_{pipeline} = \alpha \times CI_{pipeline} \quad \text{Équation 8}$$

D'après les équations 7-8, si nous supposons que le cycle de vie d'un pompage est  $t_{pipeline}$ , donc la formule de coût total annuel d'un pipeline est résumée, soit :

$$CTT_{pipeline} = 24,7 \times m^{0,35} \times long_{pipe}^{1,13} \times \left( \frac{1}{t_{pipeline}} + \alpha \right) \quad \text{Équation 9}$$

#### 4.1.2.2. Modélisation du coût capital et coût d'opération et maintenance d'une station pompage

Dans la littérature [139] [143] [144] [142], le coût capital d'une station pompage ( $CI_{pomp}$ ) est en général résumé à l'équation 10. La capacité d'une station pompage ( $Cap_{pomp}$ ) est déterminée par le débit de flux CO<sub>2</sub> en kg/s, la densité de flux CO<sub>2</sub> en kg/m<sup>3</sup>, la pression d'entrée ( $P_E$ ) et de sortie ( $P_S$ ) de flux CO<sub>2</sub> en MPa et l'efficacité de pompage ( $\eta$ ). Les coefficients  $coef_c$  et  $coef_d$  sont pris de valeurs 12 et 0,71, et de valeurs 2, 3 et 0,15 selon la littérature. Nous supposons que le cycle de vie d'un pompage est  $t_{pomp}$ .

$$CI\_pomp = (coef\_c \times Cap\_pomp + coef\_d) \times 10^6 \quad \text{Équation 10}$$

$$Cap\_pomp = \frac{m}{\rho} \times \frac{P_S - P_E}{\eta} \quad \text{Équation 11}$$

Le coût d'opération et maintenance d'une station pompage ( $COM\_pomp$ ) (voir l'équation 14) est composé de deux parties :

- Le coût fixe ( $CF\_pomp$ ) qui est généralement exprimé sous forme de pourcentage de 1,5 à 5% de son coût capital.
- Le coût d'énergie consommé ( $CE\_pomp$ ) qui est lié au prix de l'électricité en kWh, des heures de fonctionnement en  $h\_pomp$ , et la capacité en MWe de pompage installée.

$$CF\_pomp = \beta \times CI\_pomp \quad \text{Équation 12}$$

$$CE\_pomp = prixE \times h\_pomp \times Cap\_pomp \quad \text{Équation 13}$$

$$COM\_pomp = CF\_pomp + CE\_pomp \quad \text{Équation 14}$$

D'après les équations 9-14, le coût total annuel concernant d'une station pompage est résumé, soit l'équation 15 :

$$CTT\_pomp = (coef\_c \times \frac{m}{\rho} \times \frac{P_S - P_E}{\eta} + coef\_d) \times (\frac{1}{t\_pomp} + \beta) \times 10^6 + (prixE \times h\_pomp \times \frac{m}{\rho} \times \frac{P_S - P_E}{\eta}) \quad \text{Équation 15}$$

#### 4.1.3. Résumé de la modélisation de transport du dioxyde de carbone dans un parc éco-industriel

Nous avons évoqué que les principaux moyens de transport du dioxyde de carbone dans un parc éco-industriel sont généralement le camion et le pipeline. Les paramètres de transport en camion sont illustrés dans le Tableau 6 et l'expression de coût total d'un aller-retour est montrée à l'équation 6. Les paramètres de transport en pipeline sont illustrés dans le Tableau 7 et l'expression de coût total est donnée dans l'équation 16.



Tableau 17. Paramètres de transport du CO<sub>2</sub> en camion.

Symbol	Explication	Unité
$coef\_a$	le coefficient du coût fixe de transport du CO <sub>2</sub> en camion	/
$coef\_b$	le coefficient du coût fixe de transport du CO <sub>2</sub> en camion	/
$pc$	le poids du camion équipé	t
$cphsc$	le carburant consommé du camion par heure sans charge	gal/h
$prixC$	le prix de carburant	€/gal
$d_{ij}$	la distance routière entre les deux industries i et j	km
$v$	la vitesse du camion	km/h
$cm$	la capacité du camion	tCO <sub>2</sub>

Tableau 18. Paramètres de transport du CO<sub>2</sub> en pipeline.

Symbol	Explication	Unité
$long\_pipe_{ij}$	la longueur du pipeline entre deux industries i et j	km
$coef\_c_i$	le coefficient du coût d'investissement de la station pompage de l'industrie i	/
$coef\_d_i$	le coefficient du coût d'investissement de station pompage de l'industrie i	/
$prixE$	le prix d'électricité	€/kWh
$\alpha_i$	le coût annuel d'opération et maintenance du pipeline sous forme de pourcentage de son coût d'investissement pour l'industrie i	%
$\rho_i$	la densité du flux CO <sub>2</sub> de l'industrie i	kg/m <sup>3</sup>
$p_{Si}$	la pression de la sortie de la station pompage de l'industrie i	MPa
$p_{Ei}$	la pression de l'entrée de la station pompage de l'industrie i	MPa
$\eta_i$	l'efficacité du pompage de l'industrie i	%
$\beta_i$	le coût fixe de la station pompage sous forme de pourcentage de son coût capital pour l'industrie i	%

$h\_pomp_i$	l'heure de fonctionnement du pompage de l'industrie i	h
$t\_pipeline_{ji}$	la vie d'utilisation d'un pipeline de l'industrie i vers une autre industrie j.	an
$t\_pomp_i$	la vie d'utilisation d'un pompage de l'industrie i vers une autre industrie j.	an

D'après les équations 9 et 15, le coût total de transport du dioxyde de carbone en pipeline, qui inclut la partie de pipeline et la partie de station pompage, est résumé et exprimé dans une seule équation, soit l'équation 16 :

$$\begin{aligned}
 CTT\_pipe \& \ pomp = 24,7 \times m^{0,35} \times long\_pipe^{1,13} \\
 \times \left( \frac{1}{t\_pipeline} + \alpha \right) & + (coef\_c \times \frac{m}{\rho} \times \frac{p_s - p_E}{\eta} + coef\_d) \\
 \times \left( \frac{1}{t\_pomp} + \beta \right) \times 10^6 & + (prixE \times h\_pomp \times \frac{m}{\rho} \times \frac{p_s - p_E}{\eta})
 \end{aligned}
 \tag{Equation 16}$$

## 4.2. Coût du Captage CO2

### 4.2.1. Les centrales

CCS est une technologie émergente dans le secteur de l'énergie, où il n'a pas encore été démontrée à grande échelle. Les informations actuelles de coût et de performance liées au CSC de génération de puissance sont limitées à des estimations provenant des études d'ingénierie et des projets pilotes. [145]

Tableau 19. Coût du captage du CO<sub>2</sub> dans les centrales électriques [61]

Type de centrale électrique	Gamme du coût du captage (\$US/tCO <sub>2</sub> )	Capacité (MW)
Centrale à charbon	31-56	329-676
Centrale à gaz naturel	33-57	323-692
Centrale à cycle combiné (charbon et gaz naturel)	11-35	351-820

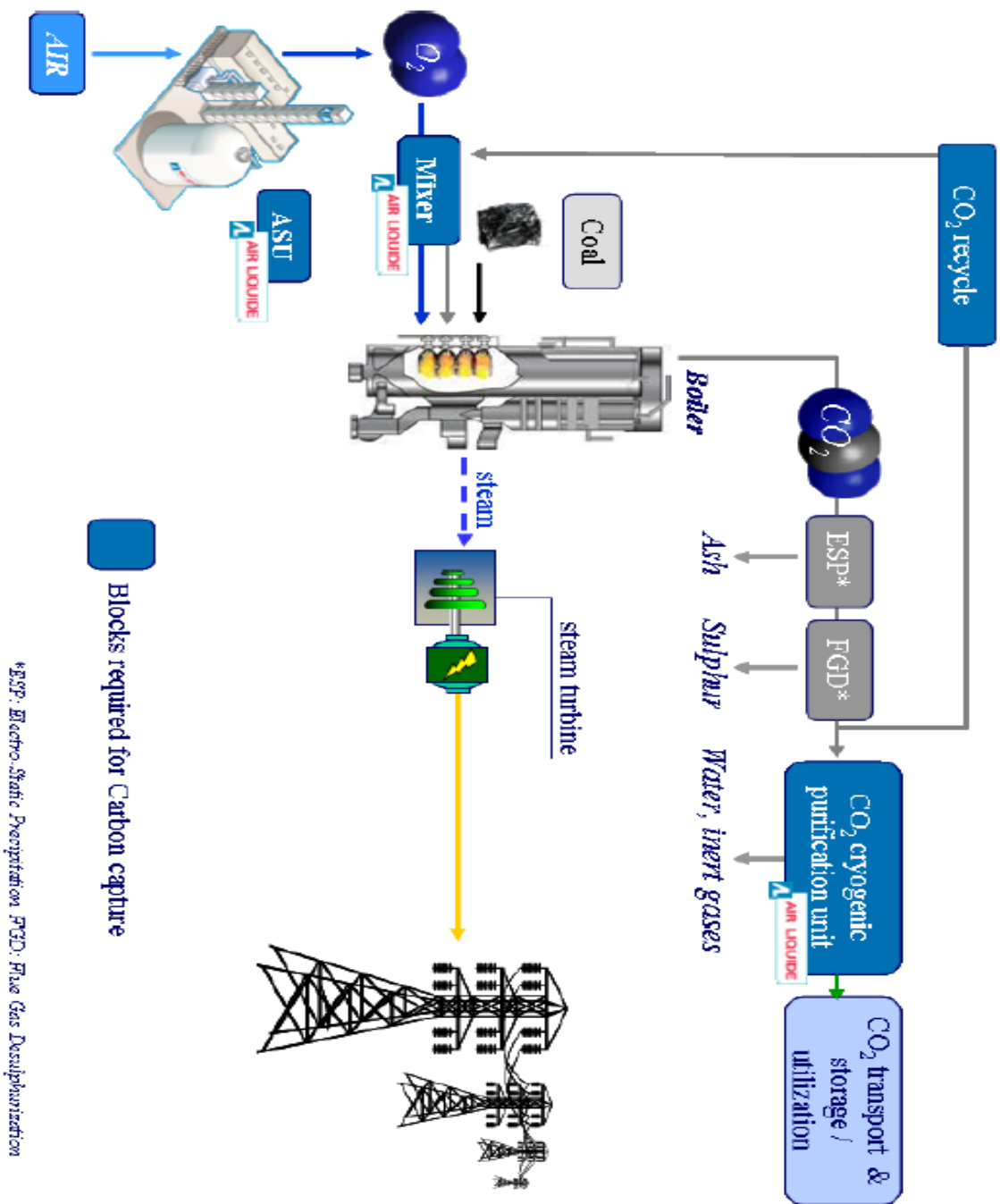


Figure 31. Principe d'oxycombustion (Air Liquide) sur les chaudières à charbon [146].

#### 4.2.2. Industries de fer et d'acier

Les industries de fer et d'acier est une grande source des émissions du dioxyde de carbone. La préoccupation de recherches connexes est à identifier les processus les plus polluants et à réduire ses émissions utilisant des technologies appropriées [147] [148] [149] [150] [151] [152] [153].

Les principales sources des émissions de CO<sub>2</sub> dans une usine d'aciérie intégrée sont :

- la cokerie,
- le haut fourneau,
- l'usine de frittage,
- le four à chaux,
- le laminoir.

Tableau 20. Les coûts de captage du CO<sub>2</sub> en industrie du fer et d'acier [149].

Technologie	Source CO <sub>2</sub>	Taux de réduction	Coût de captage du CO <sub>2</sub> (\$US/tCO <sub>2</sub> )	Année
Postcombustion avec MEA (Mono-Ethanol Amine)	gaz fumée de haut fourneau	55%	72	2011
Postcombustion avec MEA	gaz de combustion du coke four	20%	79	2011
Postcombustion avec MEA	gaz fumée de haut fourneau	50%	59,6-116,30	2013
Postcombustion avec MEA	gaz fumée de haut fourneau	50%	93	2013
Réacteur Shift avec solvant Selexol	gaz fumée de haut fourneau	30%	24-27	2003

Dans la réalité, selon la recherche d'Air Liquide [146], les deux préoccupations dans leurs recherches concernant la technologie CSC sont l'ASU (Air Separation Unit) et le CPU (Cryogenic Purification Unit), qui représentent la plus grande part des coûts associés à la capture du CO<sub>2</sub>. Au-delà de la capture du CO<sub>2</sub> sur la production d'électricité, la technologie de CPU "Cryocap<sup>TM</sup>" a été adaptée à les procédés industriels tels que le fer et l'acier, notamment les hauts fourneaux. En plus de la capture du carbone, cette technologie a apporté également des améliorations de productivité potentielle.

#### 4.2.3. Industries de raffineries

Les sources des émissions du CO<sub>2</sub> dans une usine raffinerie ou du produit chimique sont [154] [149] :

- les chaudières à vapeur et des appareils de chauffage industriel,
- les régénérateurs de la fissuration unité catalytique fluide (FCC),
- la production d'hydrogène,
- les fusées,

- le méthane de reformage à la vapeur,
- l'incinération,
- les utilitaires.

Pour les raffineries, les plus grandes sources des émissions de CO<sub>2</sub> sont les fours et les chaudières qui peuvent monter jusqu'à environ 60% des émissions [155]. Parce que la chaleur est nécessaire pour la séparation de la charge liquide, à fournir de la chaleur de la réaction au processus du raffinage tels que la réforme et à la fission. Les deuxièmes grandes sources des émissions sont les régénérateurs de la fission d'unité catalytique fluide qui peuvent monter jusqu'à environ 50% des émissions.

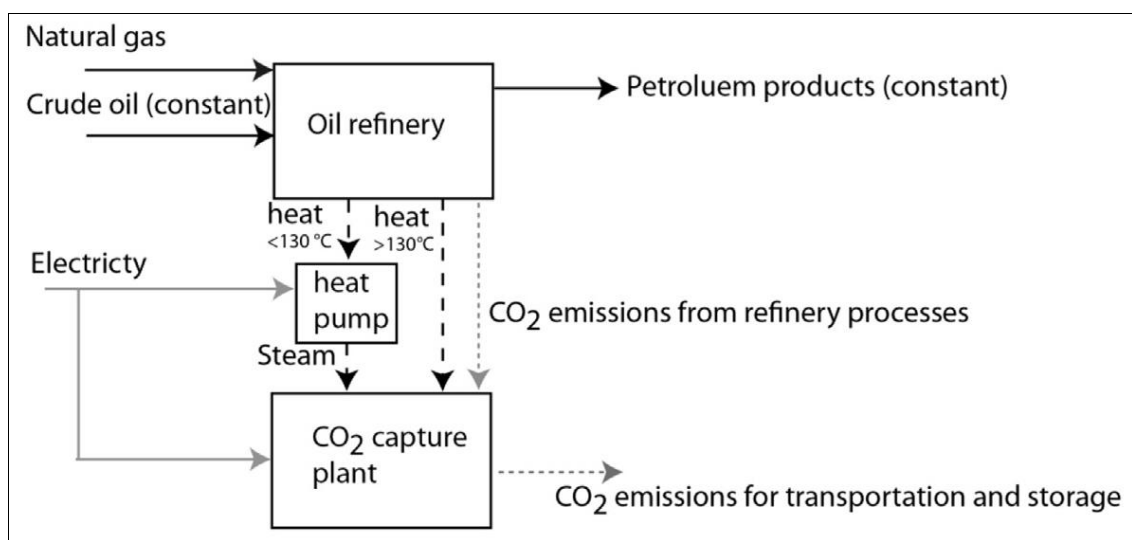


Figure 32. [156] Le captage système du CO<sub>2</sub> en postcombustion.

Un modèle du coût d'investissement du captage CO<sub>2</sub> en postcombustion a été proposé [156] et il dépend de la quantité du CO<sub>2</sub> capturé variant dans l'intervalle entre 370000 et 2000000 tonnes, soit :

$$CI_{\text{postcombustion}} = 0,0053 \times \text{TonneCO}_2\text{captureParAn}^{0,75} \quad \text{Équation 17}$$

Tableau 21. Coût du captage du CO<sub>2</sub> en raffineries [149] [157].

Technologie	Source CO <sub>2</sub>	Taux de réduction	Coût de captage de CO <sub>2</sub> (\$US/tCO <sub>2</sub> )	Année
postcombustion	gazéificateur	15%	41	2010
oxycombustion	chaudières / fours	/	65	2005
postcombustion	la pile combinée	50%	69	1995
postcombustion	la pile combinée	50%	123	2010
postcombustion	Unité FCC	74%	51	2011

#### 4.2.4. Industries de ciment

Les émissions d'usine de ciment peuvent donc être attribuées à deux sources principales: le CO<sub>2</sub> libéré de la charge par la réaction de calcination et le CO<sub>2</sub> libéré par la combustion des combustibles fossiles pour le chauffage du four. La plus grande source d'émission est la calcaire décomposition qui peut dépasser 60% des émissions globales [158] [159].

Tableau 22. Coût du captage du CO<sub>2</sub> dans les différentes cimenteries [149].

Technologie	Source CO <sub>2</sub>	Taux de réduction	Coût de captage de CO <sub>2</sub> (\$US/tCO <sub>2</sub> )	Année
Oxycombustion (avec bouclage de calcium)	calcaire décomposition	94%	16,85	2011
Oxycombustion (avec bouclage de calcium)	calcaire décomposition	84%	22,24	2012
Oxycombustion (avec bouclage de calcium)	calcaire décomposition	60%	35	2010
Oxycombustion (avec bouclage de calcium)	calcaire décomposition	52%	62	2009
postcombustion	/	60%	89	2010
postcombustion	/	77%	170	2009

### 4.3. Concept et modélisation d'un parc éco-industriel

Dans un parc éco-industriel, les industries peuvent être identifiées du type 'source CO<sub>2</sub>' et du type 'client CO<sub>2</sub>'. Les industries sources typiques sont les centrales, les raffineries, les cimenteries, les industries du fer et d'acier. Les industries clients sont variées selon les utilisations du CO<sub>2</sub> dans les différents secteurs.

#### 4.3.1. Conception de industries du type 'source CO<sub>2</sub>'

Pour l'émission de l'industrie source CO<sub>2</sub>, outre que l'option de l'émission directe dans l'air, la technologie du captage du CO<sub>2</sub> peut être intégrée dans l'industrie i pour réduire son émission polluant et obtenir simultanément l'accroissement économique. Actuellement, dans la réalité, la technologie du captage est en générale uni-tâche, c'est-à-dire que le CO<sub>2</sub> capturé est du type unique. Le captage procédé des multitâches pourrait être nécessaire pour répondre à l'évolution future des réseaux de dioxyde de carbone. Dans cette modélisation, nous supposons que le captage peut produire des

CO<sub>2</sub> capturés ayant des différentes qualités. La conception est montrée dans la Figure 33.

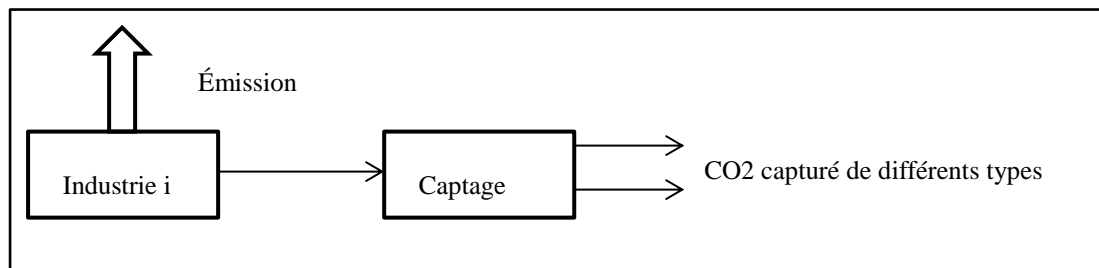


Figure 33. Illustration de l'industrie 'sourceCO<sub>2</sub>'.

#### 4.3.2. Conception de industries du type 'client CO<sub>2</sub>'

Les utilisations classiques déjà commercialisées du CO<sub>2</sub> sont : les boissons gazeuses, le food processing comme surgelés et fourgons réfrigérés, le traitement d'eau, le soudage et le nettoyage. Pour la gazéification des boissons et le food processing, un CO<sub>2</sub> très pur est utilisé : on parle de CO<sub>2</sub> de la qualité 'alimentaire', or ce n'est pas réalisable par tous les procédés de captage. Il existe aussi de multiples applications de niche comme les utilisations du CO<sub>2</sub> supercritique de la qualité 'pharmaceutique' pour la cosmétique, la pharmacie ou l'électronique.

Outre ses utilisations classiques, il existe également les autres utilisations en stage de pilot ou de recherche. Comme évoqué dans la section 1.7.2 du chapitre 1, le CO<sub>2</sub> peut être valorisé pour la culture d'algues, pour la minéralisation de carbonate, pour la bauxite résidu carbonatation, pour la transformation des polymères, pour le durcissement de béton, pour la production de carburant liquide, et pour le rendement de l'urée stimulé.

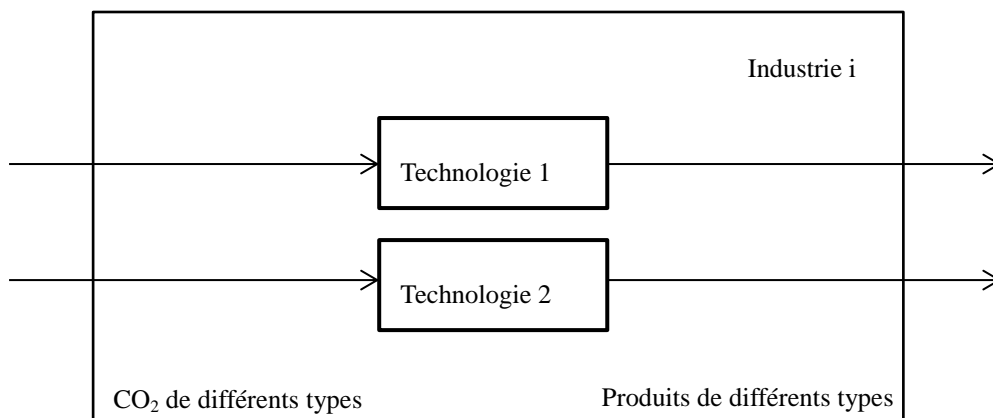


Figure 34. Illustration de l'industrie 'client CO<sub>2</sub>'.

### 4.3.3. Variables, contraintes et objectif de la modélisation d'optimisation pour les parcs éco-industriels

Dans cette section, nous allons préciser les variables et les contraintes utilisées dans la modélisation et l'optimisation des parcs éco-industriels. L'objectif est à minimiser les émissions du CO<sub>2</sub> dans un parc éco-industriel et à maximiser la performance économique de ce parc simultanément.

#### 4.3.3.1. Pour les industries du type source CO<sub>2</sub>

Les bilans massiques sont respectés par les contraintes comme les équations 17 et 18. Les paramètres sont illustrés dans le Tableau 12 de la section 2.3.1.

Tableau 23. Paramètres de l'industrie i du type source CO<sub>2</sub>.

Symbol	Explication	Unité
$qe_i$	Quantité d'émission CO <sub>2</sub> de l'industrie i.	t
$tc_i$	Taux du captage du CO <sub>2</sub> de l'industrie i.	%
$pv_i^k$	Prix vente du CO <sub>2</sub> capturé en type k de l'industrie i dans le parc.	€/t CO <sub>2</sub>
$pvo_i^k$	Prix vente du CO <sub>2</sub> capturé en type k de l'industrie i pour les industries dehors du parc.	€/t CO <sub>2</sub>
$tcp_i$	Taxe carbone à payer par l'industrie i.	€/t CO <sub>2</sub>
$cc_i^k$	Coût du captage du CO <sub>2</sub> du type k de l'industrie i.	€/t CO <sub>2</sub>

Tableau 24. Variables de l'industrie i du type source CO<sub>2</sub>.

Symbol	Explication	Unité
$XC_i^k$	La quantité du CO <sub>2</sub> capturé du type k de l'industrie i.	t
$X_{ji}^k$	La quantité du CO <sub>2</sub> du type k à transporter de i à j.	t
$XS_i^k$	La quantité du CO <sub>2</sub> capturé du type k à vendre aux industries dehors du parc éco-industriel	t

$$\forall i \in I, qe_i \times tc_i = \sum_{k \in K} XC_i^k \quad \text{Équation 18}$$

$$\forall i \in I, k \in K_i, XC_i^k = \left( \sum_{j \in J_{i,k}} X_{ji}^k \right) + XS_i^k \quad \text{Équation 19}$$



#### 4.3.3.2. Pour les industries du type client CO<sub>2</sub>

Pour les industries clients CO<sub>2</sub>, deux situations peuvent être considérées, soit la quantité du produit est un paramètre fixé, soit la quantité du produit est une variable dépendante de la quantité du CO<sub>2</sub> obtenue dans le parc éco-industriel. Pour la première situation, le bilan massique est respecté par les équations 19 et 20. Pour la deuxième situation, le bilan massique est respecté par les équations 21 et 22.

Tableau 25. Paramètres de l'industrie j du type client CO<sub>2</sub>.

Symbol	Explication	Unité
$qp_j^{w,p}$	Quantité du produit du type w de l'industrie j par la technologie p.	t
$tcu_{j,k}^{w,p}$	Taux du CO <sub>2</sub> utilisé du type k pour fabriquer une unité de produit du type w dans l'industrie j par la technologie p.	%
$pvs_j^w$	Prix de vente du produit du type w de l'industrie j.	€/t CO <sub>2</sub>
$pao_j^k$	Prix d'achat du CO <sub>2</sub> du type k de l'industrie j viennent des industries dehors du parc.	€/t CO <sub>2</sub>
$cp_j^{p,w}$	Coût production unitaire de produit w par la technologie p dans l'industrie j.	€

Tableau 26. Variable de l'industrie j du type client CO<sub>2</sub>.

Symbol	Explication	Unité
$XE_j^k$	La quantité du CO <sub>2</sub> du type k venant l'extérieur du parc.	t
$XP_j^{p,k}$	La quantité du CO <sub>2</sub> du type k utilisé par la technologie k de l'industrie j.	t
$X_{ji}^k$	La quantité du CO <sub>2</sub> du type k à transporter de i à j.	t
$Y_j^{w,p}$	La quantité du produit fabriqué du type w par la technologie p dans l'industrie j.	t

$$\forall j \in J, k \in K_j, \left( \sum_{i \in I_{j,k}} X_{ji}^k \right) + XE_j^k = \sum_{p \in P_j} XP_j^{p,k} \quad \text{Équation 20}$$

$$\forall j \in J, k \in K_j, p \in P_j, XP_j^{p,k} = \sum_{w \in W_j} (qp_j^{w,p} \times tcu_{j,k}^{w,p}) \quad \text{Équation 21}$$

$$\forall j \in J, k \in K_j, \sum_{i \in I_{j,k}} X_{ji}^k = \sum_{p \in P_j} XP_j^{p,k} \quad \text{Équation 22}$$

$$\forall j \in J, k \in K_j, p \in P_j, XP_j^{p,k} = \sum_{w \in W_j} (Y_j^{w,p} \times tcu_{j,k}^{w,p}) \quad \text{Équation 23}$$

#### 4.3.3.3. Pour les échanges entre les industries

Le coût total de transport d'une quantité du CO<sub>2</sub> d'une industrie i à une industrie j par pipeline ou par camion est standardisé par les expressions fournies dans la section 4.1.3.

Pour le cas du transporteur routier, traditionnellement, le frais de transport de l'industrie i à l'industrie j sera payé par l'une industrie des deux industries, soit par j si c'est en situation FOB-Free On Board (en français : sans frais à bord), soit par i si c'est en situation CIF-Cost Insurance Freight (en français : coût assurance et fret). Outre que ces deux modes évoqués, nous proposons une troisième façon du traitement de ce frais de transport le partageant entre les deux industries simultanément. La proportion du partage du coût total chargée par chaque industrie sera déterminée par le modèle afin d'encourager la performance du parc éco-industriel ciblé.

Par hypothèse, le transport entre les industries est de point à point et avec les retours vides.

Tableau 27. Variable de transport du CO<sub>2</sub> par un transporteur routier.

Symbol	Explication	Unité
$N_{ji}$	$(N_{ji} + 1)$ est le nombre de fois minimum d'aller-retour de l'industrie i à j	/
$XT_{ji,i}$	Le frais chargé par i pour les transports de i à j.	€
$XT_{ji,j}$	Le frais chargé par j pour les transports de i à j.	€

L'équation 24 sert à déterminer le nombre minimal des allers-retours pour transporter CO<sub>2</sub> de l'industrie i à l'industrie j. L'équation 25 sert à déterminer le frais de transport à partager par les deux industries i et j.

$$\forall i \in I, j \in J, N_{ji} \times cm < \sum_{k \in K} X_{ji}^k \leq (N_{ji} + 1) \times cm \quad \text{Équation 24}$$

$$\begin{aligned} \forall i \in I, j \in J, XT_{ji,i} + XT_{ji,j} &= 2(N_{ji} + 1) \times (coef\_a \times d_{ji} + coef\_b) \\ &+ (N_{ji} + 1) \times \frac{d_{ji}}{v} \times cphsc \times prixC + N_{ji} \times \frac{d_{ji}}{v} \times \frac{cm}{pc} \times cphsc \times prixC \quad \text{Équation 25} \\ &+ \frac{d_{ji}}{v} \times \frac{(\sum_{k \in K_i} X_{ji}^k) - N_{ji} \times cm}{pc} \times cphsc \times prixC \end{aligned}$$

Pour le cas de transport en pipeline, si le projet d'un parc éco-industriel inclut les constructions de pipelines, la durée du projet doit être généralement au moins 20 ans, selon l'expérience du parc éco-industriel à Kalundborg. Parce que l'investissement

concerné est très important, donc la stabilité entre des partenaires sera hyper demandée. L'équation 26 sert à déterminer le frais de transport entre les deux industries i et j par pipeline.

$$\begin{aligned}
 CTT\_pipe \& \ pomp\_ji = 24,7 \times m^{0,35} \times long\_pipe_{ji}^{1,13} \\
 \times \left( \frac{1}{t\_pipeline_{ji}} + \alpha_i \right) & + (coef\_c_i \times \frac{m}{\rho_i} \times \frac{P_{S_i} - P_{E_i}}{\eta_i} + coef\_d_i) \quad \text{Équation 26} \\
 \times \left( \frac{1}{t\_pomp_i} + \beta_i \right) \times 10^6 & + (prixE \times h\_pomp_i \times \frac{m}{\rho_i} \times \frac{P_{S_i} - P_{E_i}}{\eta_i})
 \end{aligned}$$

#### 4.3.3.4. La performance économique d'un parc éco-industriel

La performance économique d'un parc éco-industriel est importante pour encourager, stabiliser et agrandir le réseau construit. La performance économique de l'industrie i ( $PE_i$ ) dans le parc ciblé peut être exprimée en deux parties, soit :

- $E_i$ : ses bénéfices, par exemple les produits à vendre et le taxe concernée qui sera dispensée grâce à la participation d'un parc éco-industriel.
- $S_i$ : ses charges, par exemple les coûts de transport à payer, les coûts des productions, les coûts des achats des matières premières pour les productions.

$$\forall i \in I, PE_i = E_i - S_i \geq \text{seuil}_i \quad \text{Équation 27}$$

Les équations 28 et 29 servent à évaluer la performance économique de l'industrie source CO<sub>2</sub>. Les variables et les paramètres sont déjà expliqués dans les Tableaux 23 et 24.

$$\forall i \in I, E_i = \sum_k (XC_i^k \times (pv_i^k + tcp_i) + XS_i^k \times pvo_i^k) \quad \text{Équation 28}$$

$$\forall i \in I, S_i = \sum_{k \in K_i} (XC_i^k \times cc_i^k) + \sum_{j \in J_i} XT_{ji,i} \quad \text{Équation 29}$$

Les équations 30 et 31 sont pour évaluer la performance économique de l'industrie client CO<sub>2</sub> en situation dans laquelle la quantité de produit sera fixée à priori. Les variables et les paramètres sont déjà expliqués dans les Tableaux 25 et 26.

$$\forall j \in J, E_j = \sum_{w \in W_j} (pvs_i^w \times \sum_{p \in P_j} qp_j^{w,p}) \quad \text{Équation 30}$$

$$\begin{aligned}
 \forall j \in J, S_j = \sum_{k \in K_j} (pao_j^k \times XE_j^k) & + \sum_{k \in K_j} (pv_i^k \times (\sum_{i \in I_j} X_{ji}^k)) \\
 + \sum_{\substack{p \in P_j \\ w \in W_{p,j}}} (cp_j^{p,w} \times qp_j^{p,w}) & + \sum_{i \in I_j} XT_{ji,j} \quad \text{Équation 31}
 \end{aligned}$$

Les équations 32 et 33 sont pour évaluer la performance économique de l'industrie client CO<sub>2</sub> en situation dans laquelle la quantité de produit varie en dépendant de la quantité du CO<sub>2</sub> obtenue dans le parc éco-industriel ciblé. Les variables et les paramètres sont déjà expliqués dans les Tableaux 25 et 26.

$$\forall j \in J, E_j = \sum_{w \in W_j} (pv s_i^w \times \sum_{p \in P_j} Y_j^{w,p}) \quad \text{Équation 32}$$

$$\forall j \in J, S_j = \sum_{k \in K_j} (pv_i^k \times (\sum_{i \in I_j} X_{ji}^k)) + \sum_{\substack{p \in P_j \\ w \in W_{p,j}}} (cp_j^{p,w} \times Y_j^{w,p}) + \sum_{i \in I_j} XT_{ji,j} \quad \text{Équation 33}$$

#### 4.3.3.5. Fonction d'objective du modèle d'optimisation pour un parc éco-industriel

En résumé, un modèle d'optimisation du type MILP (Mixed Integer Linear Programming) a été proposé pour construire un réseau dans un parc éco-industriel pour minimiser les émissions de CO<sub>2</sub> tout en garantissant la performance économique du parc ciblé.

$$f = \sum_{i \in I, j \in J, k \in K} X_{ji}^k \quad \text{Équation 34}$$

#### 4.3.4. Résumé de la modélisation

Dans le modèle I, une industrie peut être considérée soit comme une industrie fournisseur soit comme une industrie client dans un parc éco-industriel à étudier. Les industries clients peuvent avoir les options des réceptions fixes et flexibles.

L'option de la réception fixe représente les demandes d'un matériel fixées et elles doivent être satisfaites obligatoirement. L'option de la réception flexible représente les demandes d'un matériel non fixés et qui peuvent s'adapter aux différentes situations réelles de fourniture à l'intérieur du PEI. Le modèle I est statique par rapport aux temps. Par hypothèse, la modélisation ne tient pas compte de la partie du stockage.

Tableau 28. Résumé des indices et ensembles.

Symbol	Explication
$i \in I$	L'indice pour les industries source CO <sub>2</sub> .
$j \in J$	L'indice pour les industries client CO <sub>2</sub> .
$w \in W$	L'indice pour les produits des industries clients CO <sub>2</sub> .
$p \in P$	L'indice pour les technologies des industries clients CO <sub>2</sub> .
$k \in K$	L'indice pour les types différents du CO <sub>2</sub> capturé dans les industries sources CO <sub>2</sub> .

Tableau 29. Résumé des paramètres.

Symbol	Explication	Unité
$qe_i$	La quantité d'émission du CO <sub>2</sub> de l'industrie i.	t
$tc_i$	Le taux de captage du CO <sub>2</sub> de l'industrie i.	%
$pv_i^k$	Le prix vente du CO <sub>2</sub> capturé et produit du type k de l'industrie i dans le parc.	€/t CO <sub>2</sub>
$pvo_i^k$	Le prix vente du CO <sub>2</sub> capturé et produit du type k de l'industrie i pour les industries dehors du parc.	€/t CO <sub>2</sub>
$tcp_i$	La taxe carbone à payer par l'industrie i.	€/t CO <sub>2</sub>
$cc_i^k$	Le coût du captage du CO <sub>2</sub> du type k de l'industrie i.	€/t CO <sub>2</sub>
$qp_j^{w,p}$	La quantité de produit du type w de l'industrie j par la technologie p.	t
$tcu_{j,k}^{w,p}$	Le taux du CO <sub>2</sub> utilisé du type k pour fabriquer une unité de produit du type w dans l'industrie j par la technologie p.	%
$pvs_j^w$	Le prix vente du produit du type w de l'industrie j.	€/t CO <sub>2</sub>
$pao_j^k$	Le prix achat d CO <sub>2</sub> du type k de l'industrie j viennent des industries dehors du parc.	€/t CO <sub>2</sub>
$cp_j^{p,w}$	Le coût de production unitaire du produit du type w par la technologie p dans l'industrie j.	€
$seuil_i$	Le seuil économique de l'industrie i.	€
$coef\_a$	Le coefficient du coût fixe de transport du CO <sub>2</sub> en camion.	/
$coef\_b$	Le coefficient du coût fixe de transport du CO <sub>2</sub> en camion.	/
$pc$	Le poids du camion équipé.	t
$cphsc$	Le carburant consommé du camion par heure sans charge.	gal/h
$prixC$	Le prix de carburant.	€/gal
$d_{ij}$	La distance routière entre deux industries i et j.	km
$v$	La vitesse du camion.	km/h
$cm$	La capacité du camion.	tCO <sub>2</sub>
$long\_pipe_{ij}$	La longueur de pipeline entre deux industries i et j.	km
$coef\_c_i$	Le coefficient du coût d'investissement de station pompage de l'industrie i.	/

$coef\_d_i$	Le coefficient de coût d'investissement de station pompage de l'industrie i.	/
$prixE$	Le prix d'électricité.	€/kMh
$\alpha_i$	Le coût annuel d'opération et maintenance du pipeline sous forme de pourcentage de son coût d'investissement pour l'industrie i.	%
$\rho_i$	La densité du flux du CO <sub>2</sub> de l'industrie i.	kg/m <sup>3</sup>
$p_{Si}$	La pression de la sortie de station pompage de l'industrie i.	MPa
$p_{Ei}$	La pression de l'entrée de station pompage de l'industrie i.	MPa
$\eta_i$	L'efficacité de pompage de l'industrie i.	%
$\beta_i$	Le coût fixe de la station pompage sous forme de pourcentage de son coût capital pour l'industrie i.	%
$h\_pomp_i$	L'heure de fonctionnement de pompage de l'industrie i.	h
$t\_pipeline_{ji}$	La vie d'utilisation d'un pipeline de l'industrie i vers une autre industrie j.	an
$t\_pomp_{ji}$	La vie d'utilisation d'un pompage de l'industrie i pour une industrie j.	an

Tableau 30. Résumé des variables.

Symbol	Explication	Unité	Type
$XC_i^k$	La quantité du CO <sub>2</sub> capturé et produit du type k de l'industrie i.	t	$R^+$
$X_{ji}^k$	La quantité du CO <sub>2</sub> du type k à transporter de i à j.	t	$R^+$
$XS_i^k$	La quantité du CO <sub>2</sub> capturé du type k à vendre aux industries dehors du parc éco-industriel.	t	$R^+$
$XE_j^k$	La quantité du CO <sub>2</sub> du type k venant l'extérieur du parc.	t	$R^+$
$XP_j^{p,k}$	La quantité du CO <sub>2</sub> du type k utilisé par la technologie p de l'industrie j.	t	$R^+$
$Y_j^{w,p}$	La quantité du produit fabriqué du type w par la technologie p dans l'industrie j.	t	$R^+$
$N_{ji}$	$(N_{ji} + 1)$ est le nombre de fois minimum d'aller-retour de l'industrie i à j	/	$N$
$XT_{ji,i}$	Le frais chargé par i pour les transports de i à j.	€	$R^+$

$XT_{ji,j}$	Le frais chargé par j pour les transports de i à j.	€	$R^+$
-------------	---	---	-------

Un système d'optimisation d'un parc éco-industriel est formé de trois parties :

- La fonction objective à maximiser la quantité totale des échanges dans le parc ciblé.
- Les contraintes des bilans massiques de chaque industrie.
- Les contraintes des performances économiques de chaque industrie.

Dans la suite le mode de production de chaque industrie client CO<sub>2</sub> peut être flexible ou fixé à priori (voir la section 4.3.3.2.).

Les coûts de transports sont pris en considération. L'expression du coût total annuel du transport de CO<sub>2</sub> par pipeline de l'industrie i vers une autre industrie j est exprimée dans l'équation 26. Les expressions des coûts totaux de transport routier de CO<sub>2</sub> sont données dans les équations 24 et 25. Ces coûts sont pris en compte et intégrés dans la modélisation d'un parc éco-industriel selon les besoins pratiques.

Par exemple, un système en situation dans laquelle les quantités des produits des industries clients CO<sub>2</sub> sont fixées pour le transport en camion-citerne est résumé sous la forme (PI) suivant :

$$(PI) : \text{maximiser } f = \sum_{i \in I, j \in J, k \in K} X_{ji}^k \text{ telle que :}$$

$$(1) \forall i \in I, qe_i \times tc_i = \sum_{k \in K} XC_i^k$$

$$(2) \forall i \in I, k \in K_i, XC_i^k = \left( \sum_{j \in J_{i,k}} X_{ji}^k \right) + XS_i^k$$

$$(3) \forall j \in J, k \in K_j, \left( \sum_{i \in I_{j,k}} X_{ji}^k \right) + XE_j^k = \sum_{p \in P_j} XP_j^{p,k}$$

$$(4) \forall j \in J, k \in K_j, p \in P_j, XP_j^{p,k} = \sum_{w \in W_j} (qp_j^{w,p} \times tcu_{j,k}^{w,p})$$

$$(5) \forall i \in I, j \in J, N_{ji} \times cm < \sum_{k \in K} X_{ji}^k \leq (N_{ji} + 1) \times cm$$

$$(6) \forall i \in I, j \in J, XT_{ji,i} + XT_{ji,j} = 2(N_{ji} + 1) \times (coef\_a \times d_{ji} + coef\_b) \\ + (N_{ji} + 1) \times \frac{d_{ji}}{v} \times cphsc \times prixC + N_{ji} \times \frac{d_{ji}}{v} \times \frac{cm}{pc} \times cphsc \times prixC \\ + \frac{d_{ji}}{v} \times \frac{(\sum_{k \in K_i} X_{ji}^k) - N_{ji} \times cm}{pc} \times cphsc \times prixC$$

$$(7) \forall i \in I, PE_i = E_i - S_i \geq seuil_i$$

$$(8) \forall i \in I, E_i = \sum_k (XC_i^k \times (pv_i^k + tcp_i) + XS_i^k \times pvo_i^k)$$

$$(9) \forall i \in I, S_i = \sum_{k \in K_i} (XC_i^k \times cc_i^k) + \sum_{j \in J_i} XT_{ji,i}$$

$$(10) \forall j \in J, E_j = \sum_{w \in W_j} (pvs_i^w \times \sum_{p \in P_j} qp_j^{w,p})$$

$$(11) \forall j \in J, S_j = \sum_{k \in K_j} (pao_j^k \times XE_j^k) + \sum_{k \in K_j} (pv_i^k \times (\sum_{i \in I_j} X_{ji}^k)) \\ + \sum_{\substack{p \in P_j \\ w \in W_{p,j}}} (cp_j^{p,w} \times qp_j^{p,w}) + \sum_{i \in I_j} XT_{ji,j}$$

Le système dont les quantités des produits des industries clients CO<sub>2</sub> varient et le coût de transport en camion-citerne dépend de la quantité produite, est résumé sous la forme (P2) suivant :

$$(P2) : \text{maximiser } f = \sum_{i \in I, j \in J, k \in K} X_{ji}^k \text{ telle que :}$$

$$(1) \forall i \in I, qe_i \times tc_i = \sum_{k \in K} XC_i^k$$

$$(2) \forall i \in I, k \in K_i, XC_i^k = (\sum_{j \in J_{i,k}} X_{ji}^k) + XS_i^k$$

$$(3) \forall j \in J, k \in K_j, \sum_{i \in I_{j,k}} X_{ji}^k = \sum_{p \in P_j} XP_j^{p,k}$$

$$(4) \forall j \in J, k \in K_j, p \in P_j, XP_j^{p,k} = \sum_{w \in W_j} (Y_j^{w,p} \times tcu_{j,k}^{w,p})$$

$$(5) \forall i \in I, j \in J, N_{ji} \times cm < \sum_{k \in K} X_{ji}^k \leq (N_{ji} + 1) \times cm$$



$$\begin{aligned}
(6) \forall i \in I, j \in J, XT_{ji,i} + XT_{ji,j} &= 2(N_{ji} + 1) \times (coef\_a \times d_{ji} + coef\_b) \\
&+ (N_{ji} + 1) \times \frac{d_{ji}}{v} \times cphsc \times prixC + N_{ji} \times \frac{d_{ji}}{v} \times \frac{cm}{pc} \times cphsc \times prixC \\
&+ \frac{d_{ji}}{v} \times \frac{(\sum_{k \in K_i} X_{ji}^k) - N_{ji} \times cm}{pc} \times cphsc \times prixC \\
(7) \forall i \in I, PE_i = E_i - S_i &\geq seuil_i \\
(8) \forall i \in I, E_i = \sum_k (XC_i^k \times (pv_i^k + tcp_i) + XS_i^k \times pvo_i^k) \\
(9) \forall i \in I, S_i = \sum_{k \in K_i} (XC_i^k \times cc_i^k) + \sum_{j \in J_i} XT_{ji,i} \\
(10) \forall j \in J, E_j = \sum_{w \in W_j} (pvs_i^w \times \sum_{p \in P_j} Y_j^{w,p}) \\
(11) \forall j \in J, S_j = \sum_{k \in K_j} (pv_i^k \times (\sum_{i \in I_j} X_{ji}^k)) + \sum_{\substack{p \in P_j \\ w \in Wp,j}} (cp_j^{p,w} \times Y_j^{w,p}) + \sum_{i \in I_j} XT_{ji,j}
\end{aligned}$$

#### 4.4. Exemple numérique

Le système de la modélisation algébrique général (GAMS, en anglais : General Algebraic Modeling System) est un système de modélisation de haut niveau pour la programmation mathématique et l'optimisation. Il était initié par la Banque Mondiale (voir [160]). Nos simulations numériques sont réalisées avec un PC DELL du processeur de type : Intel(R) Core(TM) 2 Duo CPU, P7450, 2,13GHz. CPLEX utilise un algorithme de Branch-and-Cut qui résout une série de sous-problèmes de programmation linéaire.

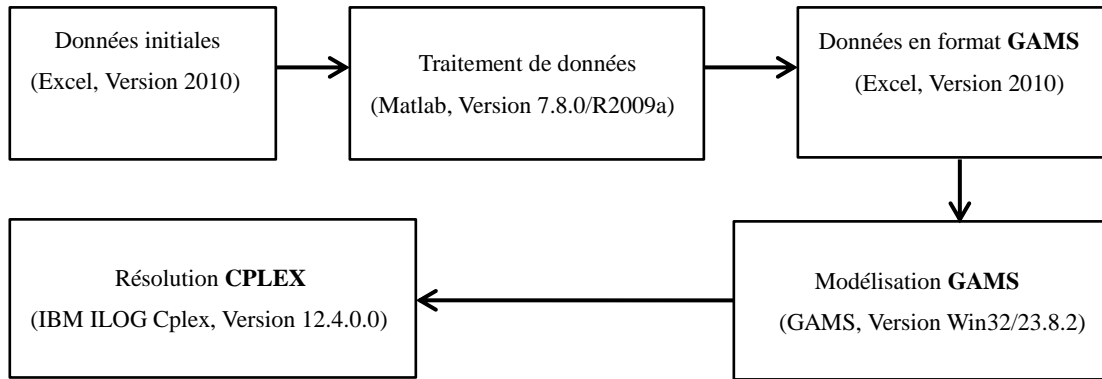


Figure 35. Etapes de simulations numériques

#### 4.4.1. Fiches des données initiales nécessaires

Dans un PEI, les industries peuvent être identifiées comme des industries du type ‘SourceCO<sub>2</sub>’ ou du type ‘ClientCO<sub>2</sub>’. Nous pouvons trouver la plupart de données correspondantes dans la littérature. Les tableaux suivants (Tableau 31 à Tableau 43) sont les tableaux désignés pour les données initiales et ils sont remplis par les données trouvées dans la littérature afin de montrer les fonctionnements de ce modèle.

Tableau 31. Industries du type Source CO<sub>2</sub>.

Nom de l'industrie source CO <sub>2</sub>	Type	Indice de CO <sub>2</sub> produit
1	Centrale à charbon	1 (niveau industriel), 2 (niveau alimentaire), 3 (niveau pharmaceutique).
2	Industrie du fer et d'acier	1, 2.
3	Industrie de raffineries	1, 2.
4	Industrie de ciment	1, 2, 3.

Tableau 32. Industries du type ClientCO<sub>2</sub>.

Nom de l'industrie client CO <sub>2</sub>	Indice Technologie	Type Technologie
5	1	CCU-transformation des polymères
6	2	CCU-minéralisation de carbonate
7	3	CCU-minéralisation de carbonate
8	4	CCU-transformation des polymères
9	5	CCU-bauxite résidu carbonatation
10	6	CCU-durcissement de béton
11	7	Production pharmaceutique
12	8	CCU-minéralisation de carbonate
13	9	CCU-culture d'algues
14	10	Production de boissons gazeuses
15	11	Production de boissons gazeuses
16	12	Production pharmaceutique
17	13	CCU-production de carburant liquide
18	14	CCU-rendement de l'urée stimulée
19	15	CCU-bauxite résidu carbonatation
20	16	CCU-transformation des polymères

Tableau 33. Fiche de données « IndustrieSourceCO<sub>2</sub> ».

Nom de l'industrie	Location x	Location y	Type CO <sub>2</sub> produit	Prix vente intérieur	Prix vente extérieur	Coût captage unitaire
1	6	6	1	35	35	35
1	6	6	2	38	38	38
1	6	6	3	40	40	40

2	2	10	1	25	25	25
2	2	10	2	30	30	30
3	1	4	1	40	40	40
3	1	4	2	45	45	45
4	11	9	1	25	25	25
4	11	9	2	30	30	30
4	11	9	3	35	35	35

Tableau 34. Fiche de données « IndustrieClientCO<sub>2</sub>Fix ».

Nom de l'industrie	Location x	Location y	Indice Technologie
5	9	1	1
6	11	3	2
7	2	4	3
8	3	7	4
9	8	5	5
10	10	7	6
11	8	9	7
12	4	11	8
13	7	11	9
14	9	12	10
15	5	4	11
16	7	3	12

Tableau 35. Fiche de données « IndustrieClientCO<sub>2</sub>NonFix ».

Nom de l'industrie	Location x	Location y	Indice Technologie
17	1	6	13
18	1	2	14
19	4	9	15
20	12	5	16

Tableau 36. Fiche de données « Coût Production ».

Nom de l'industrie	Indice Technologie	Type de produit (w)	Coût production unitaire
5	1	4	10
6	2	5	15
7	3	6	15
8	4	7	10
9	5	8	10
10	6	9	12
11	7	10	20
12	8	11	13
13	9	12	10
14	10	13	8
15	11	14	8

16	12	15	18
17	13	16	16
18	14	17	10
19	15	18	10
20	16	19	12

Tableau 37. Fiche de données « TauxCO<sub>2</sub> ».

Nom de l'industrie	Indice Technologie	Type de produit (w)	Type de CO2 utilisé	Taux de CO <sub>2</sub> utilisé par une unité de type w
5	1	4	1	0,5
6	2	5	1	0,5
7	3	6	1	0,5
8	4	7	1	0,5
9	5	8	1	0,35
10	6	9	1	0,12
11	7	10	3	0,2
12	8	11	1	0,5
13	9	12	2	1,8
14	10	13	2	0,2
15	11	14	2	0,2
16	12	15	3	0,2
17	13	16	1	3
18	14	17	1	0,74
19	15	18	1	0,35
20	16	19	1	0,5

Tableau 38. Fiche de données « TechnologieFixE ».

Nom de l'industrie	Indice Technologie	Type Entrant (k)	Prix d'achat k extérieur unitaire
5	1	1	60
6	2	1	60
7	3	1	60
8	4	1	60
9	5	1	60
10	6	1	60
11	7	3	100
12	8	1	60
13	9	2	80
14	10	2	80
15	11	2	80
16	12	3	100

Tableau 39. Fiche de données « TechnologieFixS ».

Nom de l'industrie	Indice Technologie	Type Sortant (w)	Prix de vente unitaire(w)	Quantité de type w fixé
5	1	4	60	100
6	2	5	65	50
7	3	6	65	50
8	4	7	70	100
9	5	8	80	40
10	6	9	50	60
11	7	10	100	50
12	8	11	70	60
13	9	12	80	30
14	10	13	90	40
15	11	14	95	60
16	12	15	100	50

Tableau 40. Fiche de données « TechnologieNonFixE ».

Nom de l'industrie	Indice Technologie	Type Entrant (k)	Prix d'achat k extérieur unitaire
17	13	1	60
18	14	1	60
19	15	1	60
20	16	1	60

Tableau 41. Fiche de données « TechnologieNonFixS ».

Nom de l'industrie	Indice Technologie	Type Sortant (w)	Prix de vente w unitaire
17	13	16	90
18	14	17	60
19	15	18	55
20	16	19	60

Tableau 42. Fiche de données « InfoSourceCO<sub>2</sub> ».

Nom de l'industrie	Quantité émission CO <sub>2</sub>	Taux captage	Taxe carbone	Seuil économique
1	600	0,9	100	0
2	300	0,85	100	0
3	300	0,8	100	0
4	300	0,9	100	0

Tableau 43. Fiche de données « DataCamionTransport ».

coef_a	coef_b	poids camion	CPHSC	vitesse camion	capacité camion	prix carburant
-0,083	33,56	30	0,83	90	20	4,8

#### 4.4.2. La résolution

D'après la collection des données initiales illustrées dans les tableaux précédents (voir la section 4.4.1), les traitements des données initiales sont réalisés sous l'environnement du Matlab Version 7.8.0 R2009a, ensuite les données traitées en format compatible avec l'environnement du GAMS Version Win32 23.8.2 sont préparées. Lorsque les données traitées communiquent avec le GAMS à travers la modélisation programmée, le solveur IBM ILOG CPLEX Version 12.4.0.0 est utilisé pour trouver la meilleure solution correspondant à notre modèle et les données initiales.

Les simulations ont été réalisées avec un PC muni d'un processeur de type : Intel(R) Core(TM) 2 Duo CPU, P7450, 2,13GHz. Les significations des variables sont résumées dans le Tableau 30.

Tableau 44. Temps de calcul.

Environnement /Logiciel	Temps utilisé (seconde)
Matlab	269,378
GAMS	13,476
CPLEX	3,067
<b>Total</b>	<b>285,921</b>

Tableau 45. Statistique du modèle

<b>Nombre de variables</b>	1376
<b>Nombre de variables intégrées</b>	60
<b>Nombre d'équations</b>	1312
<b>Nombre d'itérations</b>	53
<b>Objective obtenue</b>	1305

Les valeurs des variables indiquées dans le Tableau 30 peuvent être déterminées après la résolution numérique de cet exemple de modèle. Parmi ces variables, les quantités des flux d'échange entre les industries intérieures au PEI sont représentées par les variables de type  $X_{ji}^k$ , qui signifie la quantité d'un flux d'échange de type k de l'industrie i à l'industrie j et ses valeurs sont à voir dans le Tableau 46.

Tableau 46. Valeur des variables d'échange  $X_{ji}^k$ .

Industrie j	Industrie i	Type k	Valeur
5	1	1	10
5	2	1	40
6	2	1	20
7	2	1	20
7	4	1	5
8	1	1	50

9	1	1	14
12	3	1	10
12	4	1	20
13	1	2	54
14	2	2	8
17	2	1	20
17	3	1	10
17	4	1	20
18	1	1	400
18	2	1	147
18	3	1	220
18	4	1	225
20	1	1	12

Les quantités des flux d'échange venant l'extérieure du PEI sont représentées par les variables  $XE_j^k$ , qui signifie la quantité d'un flux de type k de l'industrie j venant l'extérieure du PEI (voir le Tableau 47).

Tableau 47. Valeur de  $XE_j^k$ .

Industrie j	Type k	Valeur
6	1	5
10	1	7,2
11	3	10
15	2	12
16	3	10

#### 4.4.3. Analyse de la résolution

En conclure, la situation du PEI est présentée par les variables qui sont résumées dans le Tableau 30. Précisément, les variables suivantes peuvent être déterminées :

- Les quantités des productions des industries de type 'Source CO<sub>2</sub>' :  $XC_i^k$ ,  $XP_j^{p,k}$ .
- Les quantités des productions des industries de type 'Client CO<sub>2</sub>' :  $Y_i^{w,p}$ .
- Les quantités des flux d'échange entre les industries intérieures au PEI :  $X_{ji}^k$ .
- Les quantités des flux d'échange concernant l'extérieure du PEI :  $XS_i^k$ ,  $XE_j^k$ .

- Les variables de transport :  $N_{ji}$ ,  $XT_{ji,i}$ ,  $XT_{ji,j}$ .

Par exemple, après cette résolution, les variables de type  $XS_i^k$  ont toujours des valeurs nulles. Cela signifie qu'il n'y a pas de flux d'échanges des industries à l'intérieur du PEI aux industries en dehors du PEI.

D'après les valeurs des variables du type  $X_{ji}^k$  dans le Tableau 46, les niveaux d'interaction entre les industries peuvent être calculés. Les paramètres  $rclient_{j,i}$  représentent, pour une industrie client,  $j$ , le niveau d'interaction avec une industrie source,  $i$ , par rapport aux autres industries sources, voir l'équation 36. Ses valeurs sont calculées et montrées dans le Tableau 48.

Les paramètres  $rsource_{i,j}$  représentent, pour une industrie de type source,  $i$ , le niveau d'interaction avec une industrie client,  $j$ , par rapport aux autres industries client, voir l'équation 37. Ses valeurs sont calculées et montrées dans le Tableau 49 et le Tableau 50.

$$\exists i \in I_{Source}, j \in I_{Client}, \forall l \in I_{Source}, rclient_{j,i} = \frac{\sum_{k \in K, i \in I} X_{j,i}^k}{\sum_{k \in K, l \in I} X_{j,l}^k} \quad \text{Équation 35}$$

$$\exists i \in I_{Source}, j \in I_{Client}, \forall l \in I_{Client}, rsource_{i,j} = \frac{\sum_{k \in K, i \in I} X_{j,i}^k}{\sum_{k \in K, l \in I} X_{l,i}^k} \quad \text{Équation 36}$$

Tableau 48. Niveau de « Relation Client-Source », rclient.

Industrie Client\Industrie Source	1	2	3	4
5	0,2	<b>0,8</b>	/	/
6	<b>1</b>	/	/	/
7	<b>0,8</b>	0,2	/	/
8	<b>1</b>	/	/	/
9	<b>1</b>	/	/	/
10	/	/	/	/
11	/	/	/	/
12	0,333	<b>0,667</b>	/	/
13	<b>1</b>	/	/	/
14	<b>1</b>	/	/	/
15	/	/	/	/



<b>16</b>	/	/	/	/
<b>17</b>	<b>0,4</b>	0,2	<b>0,4</b>	/
<b>18</b>	<b>0,403</b>	0,148	0,222	0,227
<b>19</b>	/	/	/	/
<b>20</b>	<b>1</b>	/	/	/

Tableau 49. Niveau de « Relation Source-Client», rsource (1).

<b>Industrie Source\Industrie Client</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>12</b>
<b>1</b>	0,019	/	/	0,093	0,026	/
<b>2</b>	0,157	0,078	0,078	/	/	/
<b>3</b>	/	/	/	/	/	0,042
<b>4</b>	/	/	0,019	/	/	0,074

Tableau 50. Niveau de « Relation Source-Client», rsource (2).

<b>Industrie Source\Industrie Client</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>20</b>
<b>1</b>	0,1	/	/	<b>0,741</b>	0,022
<b>2</b>	/	0,031	0,078	<b>0,576</b>	/
<b>3</b>	/	/	0,042	<b>0,917</b>	/
<b>4</b>	/	/	0,074	<b>0,833</b>	/

En conclure, d'après les valeurs des variables du type  $XE_j^k$  dans le Tableau 47, nous pouvons souligner que, dans ce PEI, les demandes des matériaux de type 1, 2 et 3 sont insuffisantes par rapport à la production des entreprises intérieures au PEI.

De plus, le type le plus demandé par les clients dans ce parc est le type 3. Pour tous les industries de type Source, l'industrie 18 est le client le plus important par rapport aux autres industries. L'industrie 1 est le plus important fournisseur pour les industries 6, 7, 8, 9, 13, 14, 17, 18 et 20. L'industrie 2 est le plus important fournisseur pour les industries 5 et 12. Les informations sont utiles pour le développement futur du PEI.

---

## **Chapitre 5. Modélisation d'un parc éco-industriel général multi-période, modèle II.**

---

---

---

---

## 5.1. Introduction et conception de la modélisation

Dans ce chapitre, on propose un système de gestion multi-périodes pour analyser et optimiser les parcs éco-industriels dynamiques (le temps est pris en considération). L'objectif du modèle est de maximiser la quantité totale des échanges des flux dans un parc éco-industriel afin de réduire ses impacts négatifs sur l'environnement, tout en garantissant les performances économiques des organisations participantes.

Dans le modèle II, au contraire du modèle I, une industrie peut être considérée en tant qu'industrie de type fournisseur et de type client. De plus, les difficultés pour l'établissement et le développement d'un parc éco-industriel sont principalement l'identification des flux de matière ou d'énergie et la performance économique des industries. Il semble improbable que les flux d'échange puissent satisfaire complètement les besoins des industries bénéficiaires dans la réalité. Donc, les trois options suivantes étaient prises en compte et ajoutées dans la modélisation de modèle II : l'option de remplacement de matériel, noté comme 'Option Matériel Remplacement' ; l'option de processus de traitement pour les flux sortants, noté comme 'Option Traitement S' ; et l'option de partage de coût de transport, noté comme 'Option Transport Partage'. Les trois options sont pour encourager la constitution d'un réseau élargi, solide et fiable dans un parc éco-industriel et pour améliorer sa performance de symbioses industrielle.

En ce qui concerne un échange, la quantité et les aspects économiques devraient être concernés. L'aspect quantitatif consiste essentiellement à plusieurs capacités à respecter. L'aspect économique concerne pratiquement plusieurs paramètres: le prix de vente, les investissements des processus ainsi que les coûts de transport. Tous les aspects sont estimés et intégrés dans le modèle.

Le modèle II est dynamique au niveau du temps et les paramètres peuvent évoluer et peuvent être modifiés avec le temps pour s'approcher de la réalité. Par hypothèse, seules les industries fournisseurs peuvent avoir les possibilités des traitements des matériaux. Ceci signifie qu'après réception d'un flux de matériel, les industries clients ne peuvent les utiliser que directement.

Tableau 51. Un résumé de différences entre Modèle I et Modèle II.

	<b>Modèle I</b>	<b>Modèle II</b>
Double rôles d'une industrie (fournisseur et client)	Non	Oui
Option Matériel Remplacement	Non	Oui
Option Traitement S	Non	Oui
Option Transport Partage	Oui	Oui
Stockage	Non	Oui
Contact avec des industries extérieures	Oui	Oui
Multi-périodes	Non	Oui

### 5.1.1. Option du remplacement de matériel

L'identification d'un flux de matière ou d'énergie est important mais difficile pour les développements des PEIs et il semble improbable que les flux d'échange puissent satisfaire complètement les besoins des industries bénéficiaires dans la réalité [161]. L'objectif du modèle est d'encourager la construction du potentiel PEI. En outre les échanges des types identiques, les flux d'échange peuvent être également réalisés si le type de débit pourrait être remplacé par autres types.

Tableau 52. Les exemples de la substitution actuelle des matières secondaires non dangereux pour les matériaux vierges en Pennsylvanie en 2004 [161].

Sous-produit industriel	Pour remplacer	Taux de réutilisation
coal-derived bottom ash (en français: mâchefers dérivé du charbon)	sable	74%
coal-derived fly ash (en français: charbon dérivé de cendre volante)	calcaire	48%
huile / boue huileuse (en anglais: oil/oily sludge)	huile / carburant du moteur	16%
machines réfrigérants	éthylène glycol	89%
déchets ferreux et de la poussière	acier vierge	42%
déchets de cuisine et de boues	alimentation animale	75%
scories	ciment	34%
déchets de bois	charbon / paillis	71%
déchets céramique	sable	39%

Par conséquence, entre une industrie  $i$  qui a un flux de type  $k_i$  et une deuxième industrie qui a besoin d'un flux de type  $k_j$  pour sa production, il pourrait y avoir un flux d'échange si  $k_j$  pourraient être remplacés par  $k_i$  ou ces 2 types sont identiques. En raison des différentes natures de ces deux types, l'ajustement de la quantité doit être considéré. Dans le modèle, les paramètres  $\alpha_{j,i}^{k_j,k_i}$  ont donc été utilisés, ce qui signifie qu'une unité de  $k_j$  pourrait être remplacée par  $\alpha_{j,i}^{k_j,k_i}$  unité de  $k_i$ .

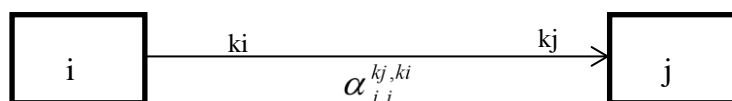


Figure 36. Le flux d'échange du type  $k_i$  de l'industrie  $i$  pour remplacer le type  $k_j$  de l'industrie  $j$ .

### 5.1.2. Option du processus de traitement des sous-produits

Comme mentionné précédemment, certains processus de traitement pourraient être nécessaires pour la réalisation d'un échange entre les industries i et j. Dans la littérature, les types communs à recycler et réutiliser après les traitements sont :

- le gypse,
- le CO<sub>2</sub>,
- la cendre,
- la boue,
- la biomasse.

Par exemple, pour le gypse [162] [163] [164], pour la cendre [165] [166] [167] [168], pour la boue [169] [170] [171] [172], pour la biomasse [173] [174] [175] [176], pour le CO<sub>2</sub> [159] [81].

### 5.1.3. Option du partage du coût de transport

Le transport joue un rôle important pour réaliser un échange. Le coût total de transport d'un flux d'échange pourrait être calculé ou estimé. Traditionnellement, ce coût sera payé par l'une des industries relatives, soit :

- En situation FOB (en anglais : Free On Board ; en français : Sans Frais à Bord).
- En situation CIF (en anglais : Cost Insurance Freight ; en français : Coût Assurance Fret).

Dans ce travail, une conception du partage de coûts des transports a été proposée et intégrée dans ce modèle. La proportion du coût qu'une industrie relative doit payer pourrait être décidée par le modèle. Par conséquent, un flux d'échange potentiel de i à j pourrait être une combinaison des options des processus des traitements et des options de partage des coûts des transports.

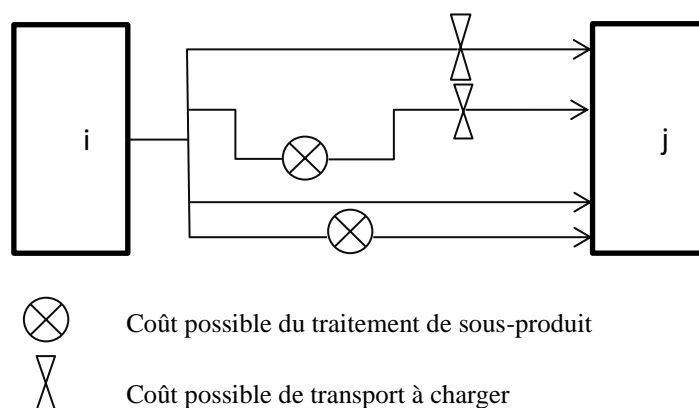


Figure 37. Le coût de transport à charger et le coût de traitement possibles du sous-produit pour la réalisation du flux d'échange entre les deux industries i et j.

## 5.2. Analyse et modélisation d'une industrie i

Chaque secteur d'activité indépendant est un élément essentiel d'un parc éco-industriel potentiel. Il pourrait être considéré comme un organisme agissant pour le système de la symbiose industrielle et pour un PEI avec ses flux des entrées et des sorties.

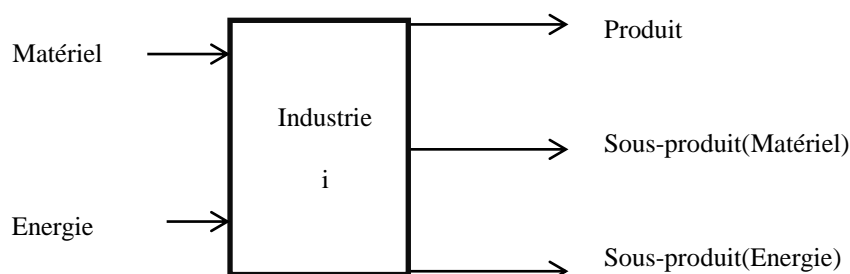


Figure 38. Illustration de l'analyse des flux de l'industrie i.

Tableau 53. Ensembles primaires du modèle.

Symbol	Explication
<i>I</i>	Industries à l'intérieur d'un PEI.
<i>T</i>	Périodes considérées.
<i>B</i>	Types de sous-produits à l'intérieur d'un PEI.
<i>P</i>	Procédés de traitements à l'intérieur d'un PEI.

### 5.2.1. Modélisation des flux sortants d'une industrie i

#### 5.2.1.1. Conception, hypothèse, paramètres et variables

Pour un flux sortant du sous-produit du type matériel, les quatre possibilités différentes des traitements du flux sont :

- Il pourrait être traité directement, par exemple, dans l'usine d'origine ou dans l'usine de traitement des déchets.
- Il pourrait être envoyé à une zone de stockage.
- Il pourrait être vendu directement aux autres industries intérieures du PEI.
- Il pourrait être traité d'abord par un processus à l'intérieur de l'industrie i et être vendu aux autres industries intérieures du PEI.

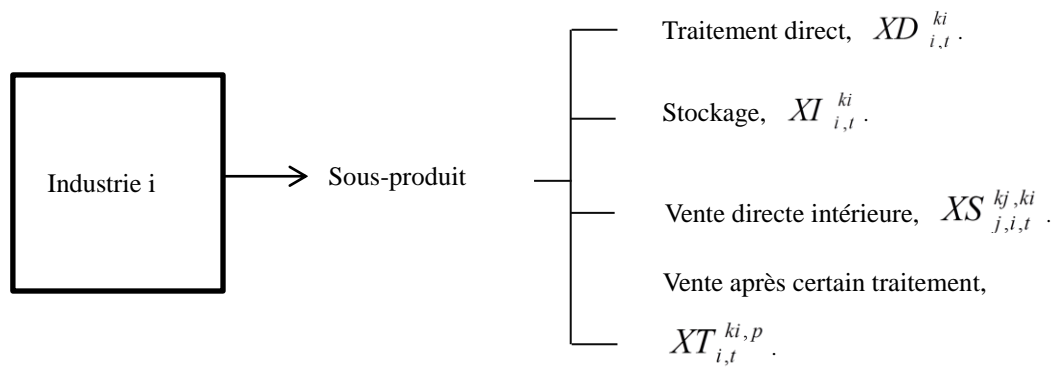


Figure 39. Les possibilités du traitement du sous-produit de l'industrie i.

Par hypothèse, les sous-produits, après les processus de traitement, pourraient être vendus directement, traités directement, ou envoyés à sa zone de stockage. Chaque processus de traitement ne comporte pas de flux d'entrée des industries extérieures du parc, mais à celles appartenant au parc éco-industriel ciblé (industries intérieures). Chaque processus peut avoir plusieurs entrées et sorties.

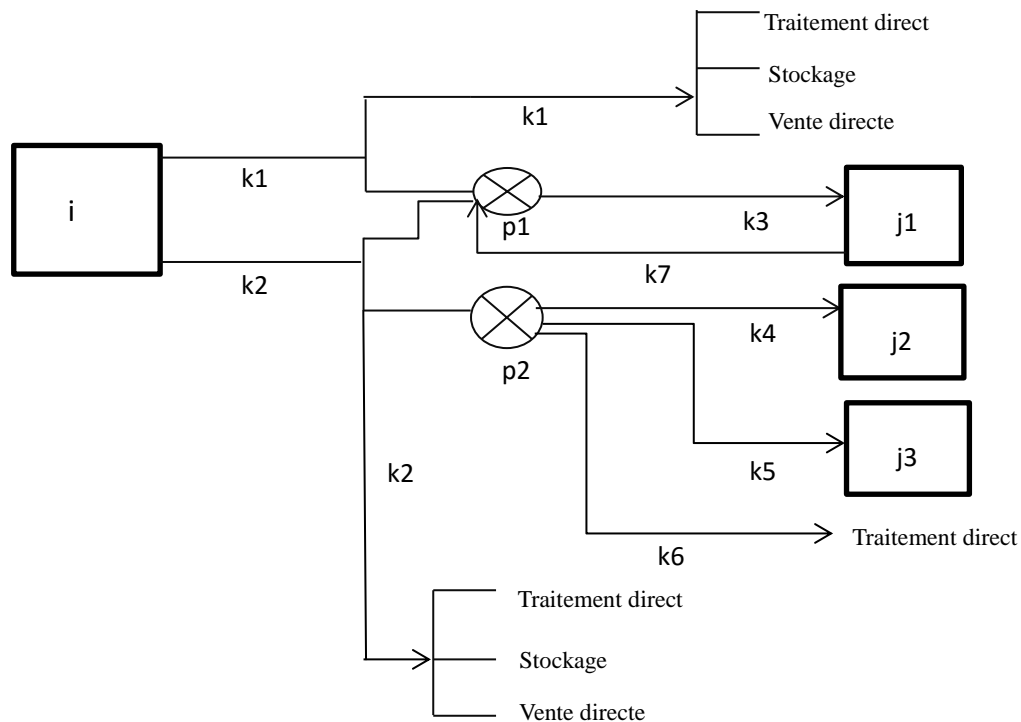


Figure 40. Un exemple schématique des sous-produits de la production d'une industrie i.



Ici les variables sont divisées en trois <<catalogues>>. Le catalogue de variables de la sortie de l'industrie  $i$ , noté catalogue 1 ; celui des variables des processus des traitements de l'industrie  $i$ , noté catalogue 2 ; et celui des variables d'échanges, noté catalogue 3.

Tableau 54. Variables des flux sortants de l'industrie  $i$ .

Symbol	Explication	Type	Catalogue	Unité
$XD_{i,t}^{ki}$	La quantité du flux sortant du type $ki$ de l'industrie $i$ qui sera traité directement pendant une période $t$ .	$R^+$	1	kg
$XI_{i,t}^{ki}$	La quantité du flux sortant du type $ki$ de l'industrie $i$ qui sera envoyé à son stockage au cours d'une période $t$ .	$R^+$	1	kg
$XS_{j,i,t}^{kj,ki}$	La quantité d'un flux d'échange de l'industrie $i$ du type $ki$ à une autre industrie $j$ pour remplacer $kj$ sans processus de traitement au cours d'une période $t$ . Les types $ki$ et $kj$ peuvent être identiques.	$R^+$	1	kg
$XT_{i,t}^{ki,p}$	La quantité d'un flux de l'industrie $i$ du type $ki$ à un processus de traitement $p$ pendant une période $t$ .	$R^+$	1	kg
$Z_{i,t}^p$	Une industrie $i$ durant une période $t$ utilise un processus de traitement $p$ ou non, 1 ou 0.	$\{0,1\}$	2	/
$XTP_{i,t}^{kip,p}$	La quantité du type $kip$ de l'industrie $i$ après le processus $p$ pendant une période $t$ .	$R^+$	2	kg
$XTT_{j,i,t}^{kj,ki,p}$	La quantité d'un flux d'échange de l'industrie $i$ du type $ki$ en utilisant le procédé de traitement $p$ de $i$ à une autre industrie $j$ pour remplacer un type $kj$ durant la période $t$ .	$R^+$	3	kg
$XIP_{i,t}^{kip,p}$	La quantité du type $kip$ après le processus $p$ de l'industrie $i$ qui sera envoyé à son stockage au cours d'une période $t$ .	$R^+$	2	kg
$XIPD_{i,t}^{kip,p}$	La quantité du type $kip$ après le processus $p$ de l'industrie $i$ qui sera traité directement au cours d'une période $t$ .	$R^+$	2	kg
$XIPS_{i,t}^{kip,p}$	La quantité du type $kip$ après le processus $p$ de l'industrie $i$ qui sera vendu directement aux industries dehors du parc pendant une période $t$ .	$R^+$	2	kg

Même ici, les paramètres peuvent également être divisés en trois catalogues: les paramètres de sortie de l'industrie  $i$  appartiennent au catalogue 1, les paramètres des processus des traitements de l'industrie  $i$  appartiennent au catalogue 2 et les paramètres d'échanges appartiennent au catalogue 3.

Tableau 55. Paramètres des flux sortants de l'industrie i.

Symbol	Explication	Catalogue	Unité
$p_{i,t}^{ki}$	La quantité de la production du type ki de l'industrie i pendant une période t.	1	kg
$i_{i,1}^{ki}$	La quantité du stockage initial du type ki de l'industrie i.	1	kg
$ctp_{i,p}^{ki}$	La capacité du traitement du type ki de l'industrie i en utilisant le processus p.	2	kg
$ci_i$	La capacité du stockage de l'industrie i.	1	m <sup>3</sup>
$v_i^{ki}$	Le volume d'une unité du type ki de l'industrie i.	1	m <sup>3</sup>
$\alpha_{j,i}^{kj,ki}$	Le taux de conversion entre une industrie i du type ki et une autre industrie j du type kj, si le type ki pourrait être utilisé par l'industrie j à remplacer le type kj, puis une unité de kj pourrait être remplacé par $\alpha_{j,i}^{kj,ki}$ unité de ki.	3	/
$cxd_{i,t}^{ki}$	Le coût unitaire du traitement direct du type ki de l'industrie i pendant une période t.	1	€/kg
$cx_i^{ki}$	Le coût unitaire du stockage du type ki de l'industrie i pendant une période t.	1	€/kg
$cx_{j,i,t}^{kj,ki}$	Le prix de vente unitaire du type ki de l'industrie i qui serait envoyé à une industrie j située à l'intérieur du PEI à remplacer le type kj pendant une période t	3	€/kg
$a_{i,t}^p$	Le coût de l'amortissement du processus p de l'industrie i durant une période t	2	€
$cxsp_{i,t}^{kip}$	Le prix de vente unitaire du type kip qui pourrait obtenu après un processus de l'industrie i durant une période t	2	€/kg
$ratio_{i,t,p}^{ki,kip}$	Le rapport entre le type ki et le type kip de l'industrie i durant une période t et kip est le principe produit du processus p de l'industrie i.	2	/
$ratiosp_{i,t,p}^{klp,kip}$	Le rapport entre le type klp et le type kip de l'industrie i durant une période t et kip est le principe produit du processus p de l'industrie i.	2	/

### 5.2.1.2. Contraintes du bilan massique

Pour un flux de la sortie du sous-produit du type ki de l'industrie i pendant une période t+1, la somme des quantités de la production et de stockage précédent est égale à la somme de ses quantités au traitement direct, à son stockage, à vendre sans processus et à vendre avec processus de traitement, voir l'équation 38. Lors du démarrage d'un parc éco-industriel, quand t = 1, son stockage initial pourrait être

intégré comme son stockage précédent, voir l'équation 37. Les variables et les paramètres sont expliqués dans les Tableaux 54 et 55.

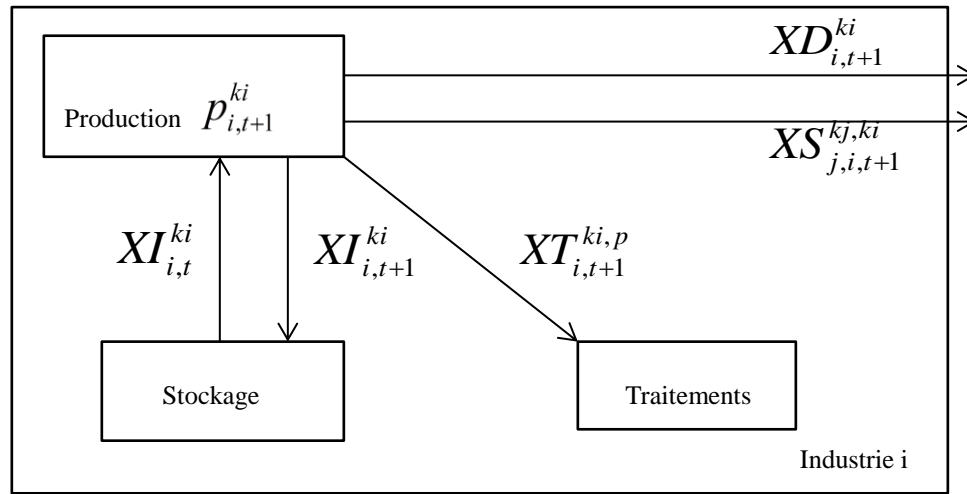


Figure 41. Illustration de la contrainte de bilan massique d'un flux sortant de l'industrie i durant une période t.

$$P_{i,1}^{ki} + i_i^{ki} = XD_{i,1}^{ki} + XI_{i,1}^{ki} + \sum_{j,kj} XS_{j,i,1}^{kj,ki} + \sum_p XT_{i,1}^{ki,p} \quad \text{Équation37}$$

$$\forall i \in I, ki \in BO_i, p \in P_i^{ki}, j \in I_i^{ki}, kj \in BIE_{j,i}^{ki}$$

$$P_{i,t+1}^{ki} + XI_{i,t}^{ki} = XD_{i,t+1}^{ki} + XI_{i,t+1}^{ki} + \sum_{j,kj} XS_{j,i,t+1}^{kj,ki} + \sum_p XT_{i,t+1}^{ki,p} \quad \text{Équation38}$$

Tableau 56. Ensembles du bilan massique de la modélisation des flux sortants d'une industrie i.

Symbol	Explication
$P_i^{ki}$	Les procédés du traitement de l'industrie i qui impliquent un type ki comme un entrée pour ce processus, $i \in I, ki \in BO_i$ .
$I_i^{ki}$	Les industries clients potentiels à acheter du type ki de l'industrie i, $i \in I, ki \in BO_i$ .
$BO_i$	Les types de sous-produits de la sortie de l'industrie i, $BO_i \subseteq B$ .
$BIP_j$	Tous les types probables d'entrée de l'industrie j, $j \in I, BIP_j = BI_j \cup_{p \in P_j} BIP_{j,p}$
$BIE_{j,i}^{ki}$	Tous les type d'entrée de l'industrie j, et l'industrie i pourrais échanger directement son type de sortie ki avec une autre industrie j, $i \in I, ki \in BO_i, j \in I_i^{ki}, BIE_{j,i}^{ki} \subseteq BIP_j$ .

### 5.2.1.3. Contraintes du processus de traitement et du stockage

La quantité d'un flux sortant du processus  $p$  de l'industrie  $i$  de type  $ki$  est limitée par la capacité de processus  $p$ , comme illustrée par l'équation 39. Le bilan massique de processus  $p$  est exprimé dans les équations 40 et 41. L'équation 41 est pour le cas quand  $t=1$ . Les variables et les paramètres sont expliqués dans les Tableaux 54 et 55.

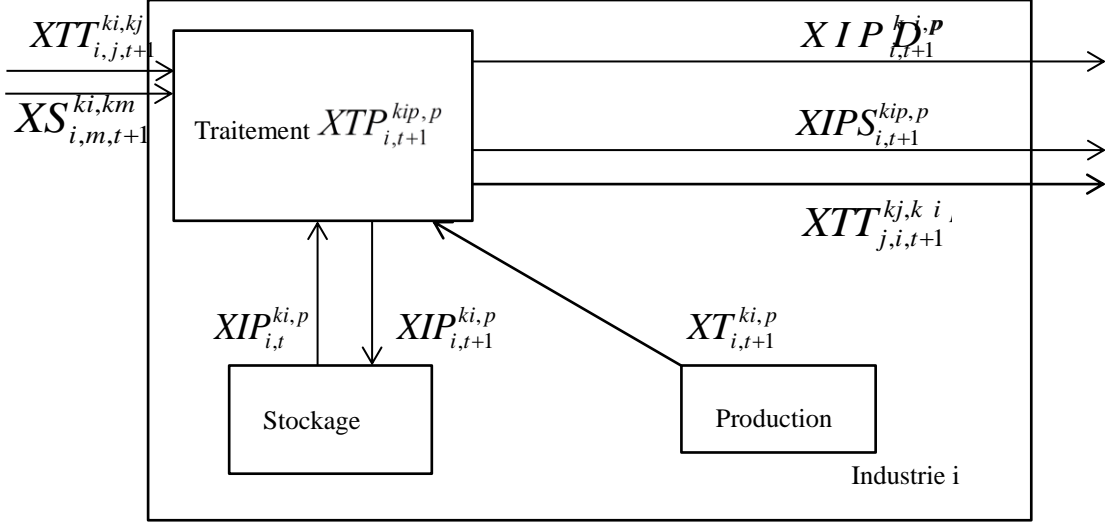


Figure 42. Illustration de contraintes d'un processus de traitement  $p$  de l'industrie  $i$ .

$$Z_{i,t}^p \times ctp_{i,p}^{ki} \geq XT_{i,t}^{ki,p} + \sum_{j,kj} (\alpha_{i,j}^{ki,kj} XTT_{i,j,t}^{ki,kj}) + \sum_{m,km} (XS_{i,m,t}^{ki,km}) \quad \text{Équation 39}$$

$$\forall i \in I, p \in P_i, ki \in BSI_{i,p}, j \in J_{i,p}^{ki}, kj \in BOPP_j, m \in BIE_{j,i}^{ki}, km \in BO_m, t \in T$$

$$\begin{aligned} & \sum_p (XIP_{i,t+1}^{kip,p}) \\ &= \sum_p (XTP_{i,t+1}^{kip,p}) + \sum_p (XIP_{i,t}^{kip,p}) - \sum_p (XIPD_{i,t+1}^{kip,p}) - \sum_p (XIPS_{i,t+1}^{kip,p}) - \sum_{j,kj} (XTT_{j,i,t+1}^{kj,kip}) \end{aligned}$$

$$\forall i \in I, p \in P_i, kip \in BOP_{i,p}, j \in I_i^{ki}, kj \in BOPP_j, t \in [1, |T| - 1] \quad \text{Équation 40}$$

$$\begin{aligned} & \sum_p (XIP_{i,t}^{kip,p}) \\ &= \sum_p (XTP_{i,t}^{kip,p}) + i_i^{kip} - \sum_p (XIPD_{i,t}^{kip,p}) - \sum_p (XIPS_{i,t}^{kip,p}) - \sum_{j,kj} (XTT_{j,i,t}^{kj,kip}) \end{aligned}$$

$$\forall i \in I, p \in P_i, kip \in BOP_{i,p}, j \in I_i^{ki}, kj \in BOPP_j, t = 1 \quad \text{Équation 41}$$

Tableau 57. Ensembles de la modélisation du processus de traitement.

Symbol	Explication
$BIE_{j,i}^{ki}$	Tous les type d'entrée de l'industrie j, et l'industrie i pourrais échanger directement son type de sortie ki avec une autre industrie j, $i \in I$ , $ki \in BO_i$ , $j \in I_i^{ki}$ , $BIE_{j,i}^{ki} \subseteq BIP_j$ .
$J_{i,p}^{ki}$	Les industries de vendeur potentiels pour la vente de certains type à remplacer un type ki de processus p de l'industrie i, $i \in I$ , $p \in P_i$ , $ki \in BSI_{i,p}$ .
$BSI_{i,p}$	Pour un vendeur potentiel industrie i, les types entrants d'un processus de traitement p, $BSI_{i,p} \subseteq BO_i$ .
$BOP_{i,p}$	Pour un vendeur potentiel industrie i, les types sortants d'un processus de traitement p, $BOP_{i,p} \subseteq B$ .
$BO_i$	Types de sous-produits sortants de l'industrie i, $BO_i \subseteq B$ .
$BOPP_i$	Tous les types probables d'entrée probable de l'industrie i, $i \in I$ , $BOPP_i = BO_i \cup_{p \in P_i} BOP_{i,p}$ .

Pour un processus de traitement  $p$  de l'industrie  $i$ , les ratios des flux entrants sont contrôlés par l'équation 44 et les ratios des flux sortants sont contrôlés par l'équation 45. La quantité de type  $kip$  disponible d'après un processus  $p$  est contrôlée par les équations 42 et 43.

$$\sum_p XTP_{i,t}^{kip,p} + i_i^{kip} \geq \sum_{j,kj} XTT_{j,i,t}^{kj,kip} \quad \text{Équation42}$$

$$\forall i \in I, p \in P, kip \in BP_i, j \in J_i^{kip} \cup BIE_{j,i}^{kip}, kj \in BIP_j, t = 1$$

$$\sum_p XTP_{i,t+1}^{kip,p} + \sum_p XIP_{i,t}^{kip,p} \geq \sum_{j,kj} XTT_{j,i,t+1}^{kj,kip} \quad \text{Équation43}$$

$$\forall i \in I, p \in P, kip \in BP_i, j \in J_i^{kip} \cup BIE_{j,i}^{kip}, kj \in BIP_j, t \in [1, |T| - 1]$$

$$XT_{i,t}^{ki,p} \times ratio_{i,t,p}^{ki,kip} = XTP_{i,t}^{kip,p} \quad \text{Équation44}$$

$$\forall i \in I, p \in P_i, ki \in BSI_{i,p}, kip \in PPAP_{i,p}, t \in T$$

$$XTP_{i,t}^{klp,p} \times ratiosp_{i,t,p}^{klp,kip} = XTP_{i,t}^{kip,p} \quad \text{Équation45}$$

$$\forall i \in I, p \in P_i, kip \in PPAP_{i,p}, t \in T, klp \in BOP_{i,p}$$

Les contraintes du stockage de l'industrie sont modélisées et inclus dans la section 5.2.3.

## 5.2.2. Modélisation des flux entrants d'une industrie j

### 5.2.2.1. Conception, hypothèse, paramètres et variables

Pour un flux du type matériel d'entrée, une industrie peut l'obtenir de quatre façons, soient:

- Il pourrait être réalisé en traitant avec des industries extérieures au PEI.
- Il peut être obtenu à partir de son propre stockage.
- Il pourrait être obtenu par les industries intérieures au PEI et pourrait être utilisé directement.
- Il pourrait être obtenu par les industries intérieures au PEI, mais il doit subir un traitement spécial pour un (ou plusieurs) processus avant son utilisation.

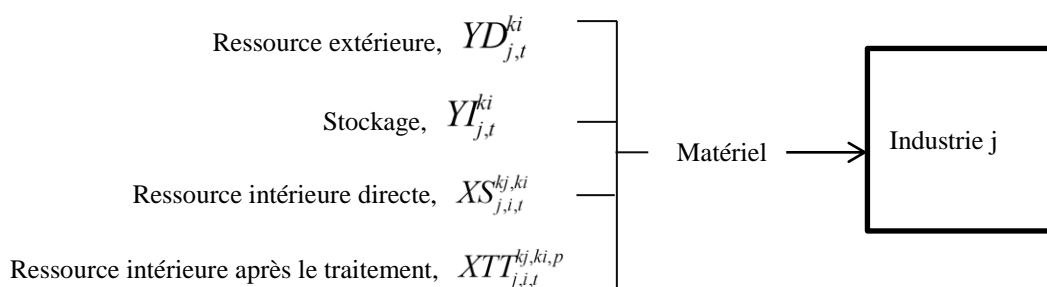


Figure 43. Les possibilités d'acquisition de matériel premier de l'industrie j.

Tableau 58. Variables des flux entrants de l'industrie j.

Symbol	Explication	Type	Unité
$YD_{j,t}^{ki}$	La quantité d'un flux d'entrée du type ki de l'industrie j qui sera obtenu à partir des industries situées à l'extérieur du PEI pendant une période t	$R^+$	kg
$YI_{j,t}^{ki}$	La quantité du stockage du type ki de l'industrie j durant une période t	$R^+$	kg
$XTT_{j,i,t}^{kj,ki,p}$	La quantité d'un flux d'échange de l'industrie i du type ki en utilisant un procédé de traitement p de i à une autre industrie j pour remplacer un type kj au cours de la période t.	$R^+$	kg
$XS_{j,i,t}^{kj,ki}$	La quantité d'un flux d'échange de l'industrie i du type ki à une autre industrie j pour remplacer kj sans processus de traitement au cours d'une période t. Les types ki et kj peuvent être identiques.	$R^+$	Kg

Tableau 59. Paramètres des flux entrants de l'industrie j.

Symbol	Explication	Type
$b_{j,t}^{ki}$	La quantité de la demande d'entrée pour la production de l'industrie j de type ki durant une période t	kg
$\alpha_{j,i}^{kj,ki}$	Le taux de conversion entre une industrie i du type ki et une autre industrie j du type kj, si le type ki pourrait être utilisé par l'industrie j à remplacer le type kj, puis une unité de kj pourrait être remplacé par $\alpha_{j,i}^{kj,ki}$ unité de ki.	/

Par hypothèse, les industries ne feraient pas de processus de traitement après avoir reçu des flux d'entrée.

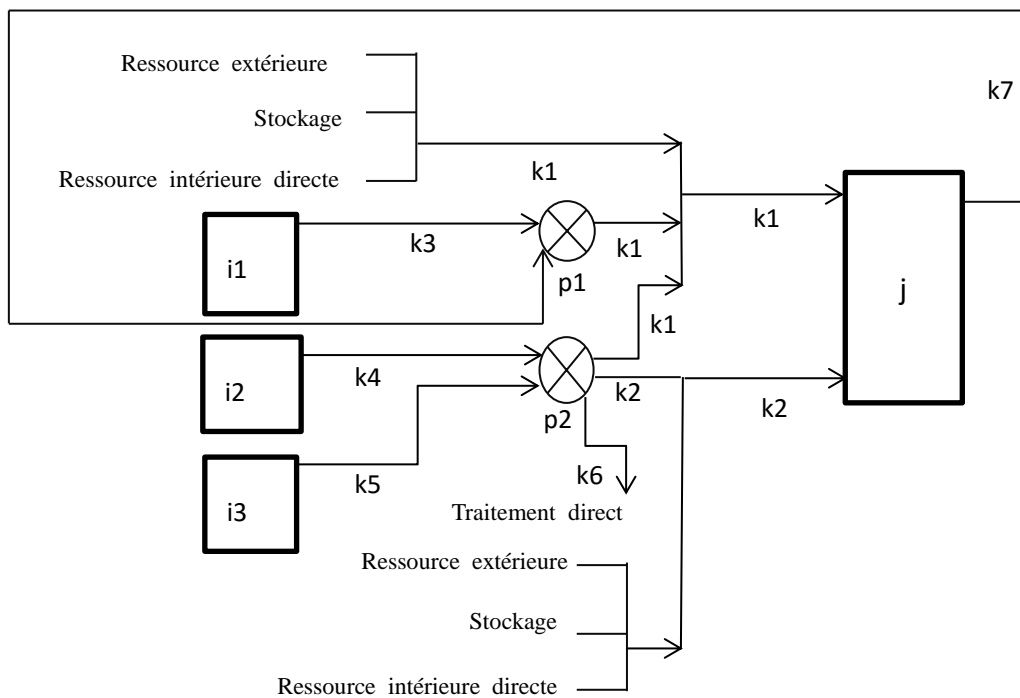


Figure 44. Un exemple schématique de sous-produits d'entrée de l'industrie j

#### 5.2.2.2. Contraintes du bilan massique et du stockage

Pour un flux entrant du type kj de l'industrie j pour une période t, la différence de la quantité du entrée et u stockage précédent est égale à la somme des quantités des ressources en dehors du PEI, du stockage, de ressource intérieure qui pourrait être utilisée directement et de ressource intérieure qui a besoin de traitement, voir l'équation 47. Lors du démarrage du PEI, quand  $t = 1$ , son stockage initial pourrait être intégré comme son stockage précédent, voir l'équation 46. Les variables et les paramètres sont expliqués dans les Tableaux 58 et 59.

$$b_{j,1}^{kj} - i_j^{kj} + YI_{j,1}^{kj} = YD_{j,1}^{kj} + \sum_{i,ki} (\alpha_{j,i}^{kj,ki} XS_{j,i,1}^{kj,ki}) + \sum_{l,klp} (\alpha_{j,l}^{kj,klp} XTT_{j,l,1}^{kj,klp}) \quad \text{Équation 46}$$

$$\forall j \in I, kj \in BI_j, i \in J_j^{kj}, ki \in BO_i, l \in JP_j^{kj}, klp \in BP_l$$

$$b_{j,t+1}^{kj} - YI_{j,t}^{kj} + YI_{j,t+1}^{kj} = YD_{j,t+1}^{kj} + \sum_{i,ki} (\alpha_{j,i}^{kj,ki} XS_{j,i,t+1}^{kj,ki}) + \sum_{l,klp} (\alpha_{j,l}^{kj,klp} XTT_{j,l,t+1}^{kj,klp}) \quad \text{Équation 47}$$

$$\forall j \in I, kj \in BI_j, i \in J_j^{kj}, ki \in BO_i, l \in JP_j^{kj}, klp \in BP_l, t \in [1, |T| - 1]$$

Tableau 60. Ensembles du bilan massique du flux entrant d'une industrie.

Symbol	Explication
$JP_i^{ki}$	Les industries de ventes potentielles pour la vente de certains type après un certain processus à remplacement un type ki de l'industrie i, $i \in I, ki \in BI_i$ .
$BI_j$	Les types de sous-produits d'entrée de l'industrie j, $BI_j \subseteq B$ .
$J_i^{ki}$	Les industries de sources potentielles pour la vente du certains type pour remplacer directement le type ki de l'industrie i, $i \in I, ki \in BI_i$ .
$BP_j$	Tous les types possibles sortants de l'industrie j en utilisant les processus, $j \in I$ , $BP_j = \bigcup_{p \in P_j} BOP_{j,p}$ .

Les contraintes de stockage de l'industrie ont être modélisées et intégrées (voir la section 5.2.3.).

### 5.2.3. Modélisation du stockage d'une industrie i

Pour une industrie i, à chaque instant, la quantité totale du stockage devrait être contrôlée par sa capacité de stockage. Nous supposons que l'expression du coût total du stockage durant une période est linéaire. Les variables et les paramètres sont expliqués dans les Tableaux 61 et 62.

Tableau 61. Variables du stockage de l'industrie i

Symbol	Explication	Type	Unité
$XI_{i,t}^{ki}$	La quantité du flux sortant du type ki de l'industrie i qui sera envoyé à son stockage au cours d'une période t.	$R^+$	kg
$XIP_{i,t}^{kip,p}$	La quantité du type kip après le processus p de l'industrie i qui sera envoyé à son stockage au cours d'une période t.	$R^+$	kg
$YI_{i,t}^{ki}$	La quantité du stockage du type ki de l'industrie i durant une période t	$R^+$	kg



Tableau 62. Paramètres du stockage de l'industrie i.

Symbol	Explication	Unité
$i_{i,1}^{ki}$	La quantité du stockage initial du type ki de l'industrie i.	kg
$ci_i$	La capacité du stockage de l'industrie i.	m <sup>3</sup>
$v_i^{ki}$	Le volume d'une unité du type ki de l'industrie i.	m <sup>3</sup>

$$ci_i - \sum_{ki} (i_i^{ki} \times v_i^{ki}) \geq \sum_{ki} (XI_{i,t}^{ki} \times v_i^{ki}) + \sum_{kp,p} (XIP_{i,t}^{kp,p} \times v_i^{kp}) + \sum_{kj} (YI_{i,t}^{kj} \times v_i^{kj}) \quad \text{Équation 48}$$

$$\forall i \in I, ki \in BO_i, p \in P_i, kp \in BOP_{i,p}, kj \in BIP_i, t \in T$$

$$ci_i \geq \sum_{ki} (XI_{i,t}^k \times v_i^k) + \sum_{kp,p} (XIP_{i,t}^{kp,p} \times v_i^{kp}) + \sum_{kj} (YI_{i,t}^{kj} \times v_i^{kj}) \quad \text{Équation 49}$$

$$\forall i \in I, ki \in BO_i, p \in P_i, kp \in BOP_{i,p}, kj \in BIP_i, t \in T$$

#### 5.2.4. Modélisation du coût de transport d'une industrie i

Pour transporter un flux d'échange de l'industrie i du type ki à une autre industrie j pour qu'il remplace un autre type kj, le coût de transport pourrait être fixé par ces deux industries concernées afin d'encourager les échanges.

Nous supposons que l'expression de coût total de transport durant une période est linéaire. Les variables et les paramètres sont expliqués dans les Tableaux 63 et 64.

Tableau 63. Variables du coût de transport.

Symbol	Explication	Type	Unité
$XTT_{j,i,t}^{kj,ki,p}$	La quantité d'un flux d'échange du type ki de l'industrie i en utilisant un procédé de traitement p de i à une autre industrie j pour remplacer un type kj au cours de la période t.	$R^+$	kg
$XS_{j,i,t}^{kj,ki}$	La quantité d'un flux d'échange du type ki de l'industrie i à une autre industrie j pour remplacer kj sans processus de traitement au cours d'une période t. Les types ki et kj peuvent être identiques.	$R^+$	kg
$TSD_{j,i,t}^{ki,kj}$	La répartition de l'industrie i du coût de transport de l'industrie i du type ki à une industrie j pour remplacer le type kj pendant une période t (ki et kj sont identiques).	$R^+$	€
$TED_{i,j,t}^{ki,kj}$	La répartition de l'industrie i de coût de transport de l'industrie j du type kj à une industrie i pour remplacer le type ki pendant une période t (ki et kj sont identiques).	$R^+$	€
$TS_{j,i,t}^{kj,ki}$	La répartition de l'industrie i de coût de transport de l'industrie i du type ki à une industrie j pour remplacer le type kj pendant une	$R^+$	€

	période t (ki et kj ne sont pas identiques).		
$TE_{i,j,t}^{ki,kj}$	La répartition de l'industrie i de coût de transport de l'industrie j du type kj à une industrie i pour remplacer le type ki pendant une période t (ki et kj ne sont pas identiques).	$R^+$	€
$TC_{i,t}$	Le coût total de transport qu'une industrie i qui sera facturé au cours d'une période t.	$R^+$	€

Tableau 64. Paramètres du coût de transport.

Symbol	Explication	Unité
$d_{j,i}^{kj,ki}$	La distance du transport d'un flux d'échange de l'industrie i du type ki à une autre industrie j du type kj.	km
$ct_{j,i}^{kj,ki}$	Le coût unitaire de transport d'un flux d'échange de l'industrie i du type ki à une autre industrie j du type kj	€/(kg.km)

$$XIT_{j,i,t}^{kj,ki} \times d_{j,i}^{kj,ki} \times ct_{j,i}^{kj,ki} = TS_{j,i,t}^{kj,ki} + TE_{i,j,t}^{ki,kj} \quad \text{Équation50}$$

$$\forall i \in I, ki \in BOP_i, j \in I, kj \in BIP_j, t \in T$$

$$XS_{j,i,t}^{kj,ki} \times d_{j,i}^{kj,ki} \times ct_{j,i}^{kj,ki} = TSD_{j,i,t}^{kj,ki} + TED_{i,j,t}^{ki,kj} \quad \text{Équation51}$$

$$\forall i \in I, ki \in BOP_i, j \in I, kj \in BIP_j, ki = kj, t \in T$$

Par conséquent, pendant une période t, le coût total de transport à la charge de l'industrie i pourrait être formulé par l'équation 52 suivante :

$$\sum_{ki} (\sum_{j,kj} TS_{j,i,t}^{kj,ki} + \sum_{l,kl} TE_{i,l,t}^{ki,kl} + \sum_{m,km} TSD_{m,i,t}^{km,ki} + \sum_{n,kn} TED_{i,n,t}^{ki,kn}) = TC_{i,t} \quad \text{Équation52}$$

$$\forall i \in I, ki \in BOP_i, j \in \bigcup_{ki} I_i^{ki}, kj \in BIP_j, l \in \bigcup_{ki} JP_i^{ki}, kl \in BOP_l, m \in \bigcup_{ki} I_i^{ki},$$

$$km \in BIP_m, n \in \bigcup_{ki} JP_i^{ki}, kn \in BOP_n, t \in T.$$

### 5.2.5. Modélisation de la performance économique d'une industrie i

Pour une industrie i, sa performance économique des flux sortants durant une période t ( $S_{i,t}$ ) est la somme des coûts des traitements directs, des coûts du stockage et des bénéfices économiques en vendant des flux des échanges aux autres industries intérieures au PEI avec ou sans processus de traitement, voir l'équation 53. Les variables et les paramètres sont résumés dans les Tableaux 66 et 67.

$$\begin{aligned}
& \sum_{ki} ((-XD_{i,t}^{ki} \times cxd_{i,t}^{ki}) + (-XI_{i,t}^{ki} \times cx_{i,t}^{ki}) + \sum_{j,kj} (XS_{j,i,t}^{kj,ki} \times cxs_{j,i,t}^{kj,ki})) \text{Équation53} \\
& + \sum_{kip} \sum_{n,kn} (XTT_{n,i,t}^{kn,kip} \times cxs_{n,i,t}^{kn,kip}) + \sum_{kit} \sum_{l,kl} (-XTT_{i,l,t}^{kit,kl} \times cxs_{i,l,t}^{kit,kl}) \\
& + \sum_{klp,p} (-XIPD_{i,t}^{klp,p} \times cxd_{i,t}^{klp}) + \sum_{klp,p} (XIPS_{i,t}^{klp,p} \times cxs_{i,t}^{klp}) = S_{i,t}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \forall i \in I, ki \in BO_i, j \in I_i^{ki}, kj \in BIE_{j,i}^{ki}, n \in I_i^{ki}, kn \in BI_j, kip \in BP_i, kit \in BSI_{i,p}, \\
& l \in J_i^{lit}, kl \in BOP_i, t \in T.
\end{aligned}$$

De même, sa performance économique des flux entrants durant une période t ( $E_{i,t}$ ) est la somme des coûts des achats directs des industries extérieures au PEI, des coûts du stockage, et des coûts des achats des flux des échanges des autres industries intérieures au PEI qui ont ou n'ont pas été traités par les procédés, voir l'équation 54. Les variables et les paramètres sont résumés dans les Tableaux 66 et 67.

$$\begin{aligned}
E_{i,t} &= \sum_k ((-YD_{i,t}^k \times cyd_{i,t}^k) + (-YI_{i,t}^k \times cx_{i,t}^k)) \\
& + \sum_{l,kl} (-XS_{i,l,t}^{k,kl} \times cxs_{i,l,t}^{k,kl}) + \sum_{kip} \sum_{m,km} (-XTT_{i,m,t}^{kip,km} \times cxs_{i,m,t}^{kip,km})
\end{aligned}$$

$$\forall i \in I, k \in BI_i, l \in J_i^k, kl \in BO_l, m \in J_{i,p}^k, km \in BO_m, kip \in BP_i, t \in T \quad \text{Équation54}$$

La performance économique de l'industrie i pourrait être exprimée par la somme de son résultat économique d'entrée, de la sortie et ses coûts des processus des traitements, voir l'équation 55.

$$\sum_t (E_{i,t} + S_{i,t} - \sum_p (Z_{i,t}^p \times a_{i,t}^p)) \quad \forall i \in I, p \in P_i, t \in T \quad \text{Équation55}$$

Par conséquent, la performance économique totale de l'industrie i durant une période t ( $E_i$ ) peut être exprimée. Afin de réaliser des bénéfices économiques par la participation du PEI, pour une industrie i, son coût total sans la participation du PEI devrait être supérieur à celui avec la participation du PEI, voir l'équation 56. Ou il y aura des investissements provenant des autres sources ( $f_i$ ), par exemple le gouvernement, donc un paramètre pourrait être ajouté pour l'ajuster, voir l'équation 57. Les variables et les paramètres sont résumés dans les Tableaux 66 et 67.

$$E_i = \sum_t (E_{i,t} + S_{i,t} - TC_{i,t} - \sum_p (Z_{i,t}^p \times a_{i,t}^p)) \quad \forall i \in I, t \in T \quad \text{Équation56}$$

$$f_i + E_i \geq \sum_t (-\sum_{ki} (p_{i,t}^{ki} \times cxd_{i,t}^{ki}) - \sum_k (b_{i,t}^k \times cyd_{i,t}^k)) \quad \text{Équation57}$$

$$\forall i \in I, t \in T, ki \in BO_i, k \in BI_i$$

### 5.3. Fonction objective et résumé du modèle

L'objectif de ce modèle est à maximiser la quantité totale des échanges à l'intérieur d'un PEI. La fonction objective pourrait être exprimée à l'équation 58. Ce modèle est un modèle de la programmation linéaire mixte en nombres entiers.

Dans la modélisation, une industrie peut être considérée en tant que une industrie du type fournisseur et du type client. Les difficultés pour l'établissement et le développement d'un parc éco-industriel sont principalement l'identification des flux de matière ou d'énergie et la performance économique des industries. De plus, il semble improbable que les flux d'échange puissent satisfaire complètement les besoins des industries bénéficiaires dans la réalité.

Donc, les options des remplacements des matériaux, des processus des traitements et des partages des coûts des transports étaient proposées et ajoutées dans cette modélisation. Le modèle II est dynamique au niveau du temps et les paramètres sont également peuvent évoluer et changer avec le temps pour approcher la réalité. Par hypothèse, les processus des traitements sont uniquement pour les industries fournisseurs. Ceci signifie qu'après la réception d'un flux du type matériel, les industries clients peuvent seulement les utiliser directement.

$$Max \sum_{i,t} ((\sum_{ki} \sum_{j,kj} XS_{j,i,t}^{kj,ki}) + (\sum_{kip} \sum_{l,kl} XTT_{l,i,t}^{kl,kip})) \quad \text{Équation 58}$$

$$\forall i \in I, ki \in BO_i, j \in I, kj \in BIP_j, k \in BI_i, kip \in BP_i, l \in I, kl \in BIP_l, t \in T$$

Tableau 65. Résumé des ensembles du modèle.

Symbol	Explication
$I$	Les Industries à l'intérieur d'un PEI.
$I_i^{ki}$	Les industries de clients potentiels à acheter du type $ki$ de l'industrie $i$ , $i \in I, ki \in BO_i$ .
$J_i^{ki}$	Les industries de sources potentiels pour la vente de certains type pour remplacer directement le type $ki$ de l'industrie $i$ , $i \in I, ki \in BI_i$ .
$B$	Les types de sous-produits à l'intérieur d'un PEI.
$BO_i$	Les types de sous-produits sortants de l'industrie $i$ , $BO_i \subseteq B$ .
$BI_j$	Les types de sous-produits entrants de l'industrie $j$ , $BI_j \subseteq B$ .
$P$	Les procédés des traitements à l'intérieur d'un PEI.
$P_i$	Les procédés des traitements de l'industrie $i$ , $P_i \subseteq P$ .
$P_i^{ki}$	Les procédés du traitement de l'industrie $i$ qui impliquent un type $ki$ comme un entrée pour ce processus, $i \in I, ki \in BO_i$ .
$T$	Les périodes considérées.

$BOP_{i,p}$	Pour un vendeur potentiel industrie $i$ , les types sortants d'un processus de traitement $p$ , $BOP_{i,p} \subseteq B$ .
$BSI_{i,p}$	Pour un vendeur potentiel industrie $i$ , les types entrants d'un processus de traitement $p$ , $BSI_{i,p} \subseteq BO_i$ .
$BP_j$	Tous les types possibles sortants de l'industrie $j$ en utilisant les processus, $j \in I$ , $BP_j = \bigcup_{p \in P_j} BOP_{j,p}$ .
$BIP_j$	Tous les types probables entrants de l'industrie $j$ , $j \in I$ , $BIP_j = BI_j \cup \bigcup_{p \in P_j} BIP_{j,p}$ .
$BOPP_i$	Tous les types probables entrants de l'industrie $i$ , $i \in I$ , $BOPP_i = BO_i \cup \bigcup_{p \in P_i} BOP_{i,p}$ .
$BIE_{j,i}^{ki}$	Tous les type d'entrée de l'industrie $j$ , et l'industrie $i$ pourrait échanger directement son type de sortie $ki$ avec une autre industrie $j$ , $i \in I$ , $ki \in BO_i$ , $j \in I_i^{ki}$ , $BIE_{j,i}^{ki} \subseteq BIP_j$ .
$J_{i,p}^{ki}$	Les industries de vendeur potentiels pour la vente de certains type à remplacer un type $ki$ de processus $p$ de l'industrie $i$ , $i \in I$ , $p \in P_i$ , $ki \in BSI_{i,p}$ .
$JP_i^{ki}$	Les industries de vendeur potentiels pour la vente de certains type après un certain processus à remplacement un type $ki$ de l'industrie $i$ , $i \in I$ , $ki \in BI_i$ .
$PPAP_i^{kip,p}$	Le type $kip$ est le type principe du produit après un processus $p$ de l'industrie $i$ , $i \in I$ , $p \in P_i$ , $kip \in BP_j$ .

Tableau 66. Résumé des variables du modèle.

Symbol	Explication	Type
$XD_{i,t}^{ki}$	La quantité du flux sortant du type $ki$ de l'industrie $i$ qui sera traité directement pendant une période $t$ .	$R^+$
$XI_{i,t}^{ki}$	La quantité du flux sortant du type $ki$ de l'industrie $i$ qui sera envoyé à son stockage au cours d'une période $t$ .	$R^+$
$XS_{j,i,t}^{kj,ki}$	La quantité d'un flux d'échange de l'industrie $i$ du type $ki$ à une autre industrie $j$ pour remplacer $kj$ sans processus de traitement au cours d'une période $t$ . Les types $ki$ et $kj$ peuvent être identiques.	$R^+$
$XT_{i,t}^{ki,p}$	La quantité d'un flux de l'industrie $i$ du type $ki$ à un processus de traitement $p$ pendant une période $t$ .	$R^+$
$Z_{i,t}^p$	Une industrie $i$ durant une période $t$ utilise un processus de traitement $p$ ou non, 1 ou 0.	$\{0,1\}$
$XTP_{i,t}^{kip,p}$	La quantité du type $kip$ de l'industrie $i$ après le processus $p$ pendant une période $t$ .	$R^+$

$XTT_{j,i,t}^{kj,ki,p}$	La quantité d'un flux d'échange de l'industrie i du type ki en utilisant le procédé de traitement p de i à une autre industrie j pour remplacer un type kj durant la période t.	$R^+$
$XIP_{i,t}^{kip,p}$	La quantité du type kip après le processus p de l'industrie i qui sera envoyé à son stockage au cours d'une période t.	$R^+$
$XIPD_{i,t}^{kip,p}$	La quantité du type kip après le processus p de l'industrie i qui sera traité directement au cours d'une période t.	$R^+$
$XIPS_{i,t}^{kip,p}$	La quantité du type kip après le processus p de l'industrie i qui sera vendu directement aux industries dehors du parc pendant une période t.	$R^+$
$YD_{j,t}^{ki}$	La quantité d'un flux d'entrée du type ki de l'industrie j qui sera obtenu à partir des industries situées à l'extérieur du PEI pendant une période t	$R^+$
$YI_{j,t}^{ki}$	La quantité du stockage du type ki de l'industrie j durant une période t	$R^+$
$TSD_{j,i,t}^{ki,kj}$	La répartition de l'industrie i du coût de transport de l'industrie i du type ki à une industrie j pour remplacer le type kj pendant une période t (ki et kj sont identiques).	$R^+$
$TED_{i,j,t}^{ki,kj}$	La répartition de l'industrie i de coût de transport de l'industrie j du type kj à une industrie i pour remplacer le type ki pendant une période t (ki et kj sont identiques).	$R^+$
$TS_{j,i,t}^{kj,ki}$	La répartition de l'industrie i de coût de transport de l'industrie i du type ki à une industrie j pour remplacer le type kj pendant une période t (ki et kj ne sont pas identiques).	$R^+$
$TE_{i,j,t}^{ki,kj}$	La répartition de l'industrie i de coût de transport de l'industrie j du type kj à une industrie i pour remplacer le type ki pendant une période t (ki et kj ne sont pas identiques).	$R^+$
$TC_{i,t}$	Le coût total de transport qu'une industrie i qui sera facturé au cours d'une période t.	$R^+$
$E_i$	La performance économique de l'industrie i d'un PEI.	$R$
$X$	La quantité totale des flux échanges d'un PEI à maximiser.	$R^+$

Tableau 67. Résumé des paramètres du modèle.

Symbol	Explication
$P_{i,t}^{ki}$	La quantité de la production du type ki de l'industrie i pendant une période t.
$i_{i,1}^{ki}$	La quantité du stockage initial du type ki de l'industrie i.

$ctp_{i,p}^{ki}$	La capacité du traitement du type ki de l'industrie i en utilisant le processus p.
$ci_i$	La capacité du stockage de l'industrie i.
$v_i^{ki}$	Le volume d'une unité du type ki de l'industrie i.
$\alpha_{j,i}^{kj,ki}$	Le taux de conversion entre une industrie i du type ki et une autre industrie j du type kj, si le type ki pourrait être utilisé par l'industrie j à remplacer le type kj, puis une unité de kj pourrait être remplacé par $\alpha_{j,i}^{kj,ki}$ unité de ki.
$cx_{i,t}^{ki}$	Le coût unitaire du traitement direct du type ki de l'industrie i pendant une période t.
$cx_i^{ki}$	Le coût unitaire du stockage du type ki de l'industrie i pendant une période t.
$cx_{j,i,t}^{kj,ki}$	Le prix de vente unitaire du type ki de l'industrie i qui serait envoyé à une industrie j située à l'intérieur du PEI à remplacer le type kj pendant une période t
$a_{i,t}^p$	Le coût de l'amortissement du processus p de l'industrie i durant une période t
$cx_{i,t}^{kip}$	Le prix de vente unitaire du type kip qui pourrait obtenu après un processus de l'industrie i durant une période t
$ratio_{i,t,p}^{ki,kip}$	Le rapport entre le type ki et le type kip de l'industrie i durant une période t et kip est le principe produit du processus p de l'industrie i.
$ratiosp_{i,t,p}^{klp,kip}$	Le rapport entre le type klp et le type kip de l'industrie i durant une période t et kip est le principe produit du processus p de l'industrie i.
$b_{j,t}^{ki}$	La quantité de la demande d'entrée pour la production de l'industrie j de type ki durant une période t
$d_{j,i}^{kj,ki}$	La distance de transport d'un flux d'échange de l'industrie i du type ki à une autre industrie j du type kj.
$ct_{j,i}^{kj,ki}$	Le coût unitaire de transport d'un flux d'échange de l'industrie i du type ki à une autre industrie j du type kj
$f_i$	Le support financier pour une industrie i venant de l'extérieur du parc.
$cyd_{i,t}^{ki}$	Le coût unitaire d'achat du type ki dont industrie i a besoin pour sa production venant des industries dehors un PEI pendant une période t

#### 5.4. Exemple numérique

Le système de la modélisation algébrique général (GAMS, en anglais : General Algebraic Modeling System) est un système de la modélisation de haut niveau pour la programmation mathématique et l'optimisation, initié par la Banque Mondiale (voir [160]). Nos simulations numériques sont réalisées avec un PC DELL du processeur de type : Intel(R) Core(TM) 2 Duo CPU, P7450, 2,13GHz. CPLEX utilise un algorithme de Branch-and-Cut qui résout une série de sous-problèmes de programmation linéaire.

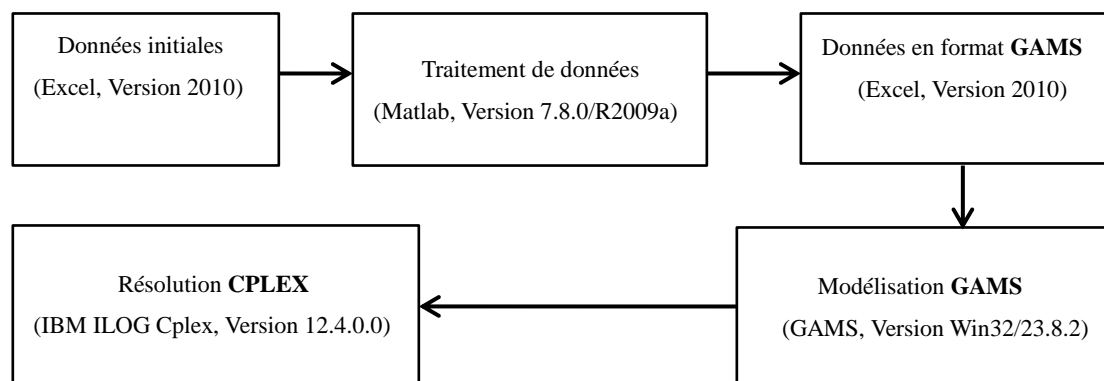


Figure 45. Etapes de simulations numériques.

#### 5.4.1. Fiches des données initiales nécessaires

Dans ce PEI, nous supposons qu’aucun stockage initial existe, le volume unitaire du stockage pour chaque type du matériel est un et nous avons totalement quatre périodes de temps à considérer. Les données aléatoires sont prises pour illustrer la démarche de ce modèle. Les tableaux suivants (Tableau 68 à Tableau 83) sont les tableaux désignés pour les données initiales et ils sont remplis par les données afin de montrer les fonctionnements de ce modèle.

Tableau 68. Fiche de données « Location ».

Indice de l'industrie	Location x	Location y
1	5	7
2	10	8
3	1	13
4	2	1
5	2	10
6	4	10
7	7	5
8	6	12
9	8	13
10	5	2
11	7	1
12	10	2
13	9	6
14	2	4
15	1	7
16	3	13
17	6	9
18	8	10
19	3	6



20	10	12
----	----	----

Tableau 69. Fiche de données « I-BO ».

<b>Indice de l'industrie</b>	<b>Indice de type de sous-produit sortant de l'industrie i, BO(i)</b>
1	1
2	2
3	3
3	4
4	5
4	6
5	7
6	8
7	9
8	9
9	10
10	11

Tableau 70. Fiche de données « I-BI ».

<b>Indice de l'industrie</b>	<b>Indice de type entrant de l'industrie i, BI(i)</b>
1	7
1	9
2	7
2	9
3	8
3	9
5	9
6	9
6	13
6	15
7	12
8	14
9	13
10	16
11	7
11	12
12	8
12	12
12	14
13	9
13	14
13	16
14	9

14	15
14	16
15	11
16	10
17	10
17	16
18	13
19	16
20	16

Tableau 71. Fiche de données « I-P-BOP-BSI ».

Indice de l'industrie	Procédé de l'industrie i, P(i)	Type principal sortant d'un procédé p de l'industrie i, PPAP(i,p)	Type entrant d'un procédé de l'industrie i, BSI(i,p)	Ratio entre BSI(i,p) et PPAP(i,p)	Type sortant d'un procédé de l'industrie i, BOP(i,p)	Ratiosp entre BOP(i,p) et PPAP(i,p)
1	1	12	1	0,9	12	1
2	2	12	2	0,85	12	1
2	2	12	2	0,85	13	1,8
3	3	14	3	0,9	14	1
3	3	14	4	0,9	14	1
4	4	13	5	0,9	13	1
4	4	13	5	0,9	15	2,5
4	4	13	5	0,9	16	2
4	4	13	6	0,8	13	1
4	4	13	6	0,8	15	2,5
4	4	13	6	0,8	16	2

Tableau 72. Fiche de données « KIKJ-Match ».

Type Ki	Type Kj (Kj peut être remplacé par Ki.)	Taux de remplacement
15	13	1,333
15	12	2,667
13	12	3
14	16	1,125
8	7	1,5

Tableau 73. Fiche de données de la capacité du stockage et le support financière de l'industrie i.

Indice de l'industrie	Capacité du stockage	Support financière, F(i)
1	1000	0
2	600	0
3	500	0
4	600	0
5	800	0

6	1000	0
7	600	0
8	800	0
9	600	0
10	1000	0
11	900	0
12	700	0
13	500	0
14	500	0
15	500	0
16	500	0
17	500	0
18	500	0
19	500	0
20	500	0

Tableau 74. Fiche de données « Quantité de production de sous-produit par période ».

Indice de l'industrie	Indice de type de sous-produit sortant	Période 1	Période2	Période 3	Période 4
1	1	400	400	400	400
2	2	300	300	0	0
3	3	300	300	300	300
3	4	300	300	300	300
4	5	0	400	400	200
4	6	0	400	400	200
5	7	100	100	100	100
6	8	100	0	100	0
7	9	100	100	100	100
8	9	0	150	0	150
9	10	50	50	50	50
10	11	80	80	80	80

Tableau 75. Fiche de données « Capacité de traitement de procédé par période ».

Indice de l'industrie	Indice de procédé	Indice de type entrant d'un procédé	Période1	Période 2	Période 3	Période 4
1	1	1	400	400	400	400
2	2	2	400	400	400	400
3	3	3	350	350	350	350
3	3	4	400	400	400	400
4	4	5	300	300	300	300
4	4	6	300	300	300	300

Tableau 76. Fiche de données de coût Transport unitaire par période.

Indice de l'industrie	Type sortant d'une industrie	Période1	Période 2	Période 3	Période 4
5	7	0,5	0,5	0,5	0,5
6	8	0,5	0,5	0,5	0,5
7	9	0,5	0,5	0,5	0,5
8	9	0,5	0,5	0,5	0,5
9	10	0,5	0,5	0,5	0,5
10	11	0,5	0,5	0,5	0,5
1	12	0,5	0,5	0,5	0,5
2	12	0,5	0,5	0,5	0,5
2	13	1	1	1	1
4	13	1	1	1	1
3	14	0,5	0,5	0,5	0,5
4	15	0,5	0,5	0,5	0,5
4	16	0,5	0,5	0,5	0,5

Tableau 77. Fiche de données de coût de traitement directement par période.

Indice de l'industrie	Type de sous-produit sortant	Période1	Période 2	Période 3	Période 4
1	1	100	100	100	100
2	2	100	100	100	100
3	3	100	100	100	100
3	4	100	100	100	100
4	5	100	100	100	100
4	6	100	100	100	100
5	7	100	100	100	100
6	8	100	100	100	100
7	9	100	100	100	100
8	9	100	100	100	100
9	10	100	100	100	100
10	11	100	100	100	100

Tableau 78. Fiche de données de prix d'achat d'un matériel venant de l'extérieur du PEI par période.

Indice de l'industrie	Type d'entrant d'une industrie	Période1	Période 2	Période 3	Période 4
1	7	25	25	25	25
1	9	15	15	15	15
2	7	25	25	25	25
2	9	15	15	15	15
3	8	15	15	15	15
3	9	15	15	15	15
5	9	15	15	15	15

6	9	60	60	60	60
6	13	15	15	15	15
6	15	40	40	40	40
7	12	30	30	30	30
8	14	60	60	60	60
9	13	55	55	55	55
10	16	40	40	40	40
11	7	40	40	40	40
11	12	25	25	25	25
12	8	60	60	60	60
12	12	15	15	15	15
12	14	60	60	60	60
13	9	55	55	55	55
13	14	15	15	15	15
13	16	55	55	55	55
14	9	40	40	40	40
14	15	15	15	15	15
14	16	30	30	30	30
15	11	40	40	40	40
16	10	15	15	15	15
17	10	20	20	20	20
17	16	20	20	20	20
18	13	40	40	40	40
19	16	40	40	40	40
20	16	40	40	40	40

Tableau 79. Fiche de données de prix de vente intérieur du PEI par période.

Indice de l'industrie	Type sortant d'une industrie	Période 1	Période 2	Période 3	Période 4
5	7	20	15	20	15
6	8	10	10	10	10
7	9	10	10	12	12
8	9	11	11	11	11
9	10	15	15	15	15
10	11	15	15	15	15
1	12	45	45	45	45
2	12	40	45	40	45
2	13	30	25	25	30
4	13	25	30	25	30
3	14	40	40	40	40
4	15	25	25	25	25
4	16	30	20	30	20

Tableau 80. Fiche de données « Quantité de demande par période ».

Indice de l'industrie	Type entrant d'une industrie	Période1	Période 2	Période 3	Période 4
1	7	50	50	50	50
1	9	30	30	0	0
2	7	40	0	40	0
2	9	30	20	30	20
3	8	50	0	0	50
3	9	40	40	40	40
5	9	40	40	40	40
6	9	150	150	150	150
6	13	50	50	50	50
6	15	30	50	50	80
7	12	200	200	200	200
8	14	100	100	100	100
9	13	30	60	30	60
10	16	40	40	40	40
11	7	50	50	50	50
11	12	20	20	20	20
12	8	0	60	0	60
12	12	20	30	20	30
12	14	80	50	80	50
13	9	50	50	50	50
13	14	30	30	30	30
13	16	60	60	60	60
14	9	20	20	20	20
14	15	50	50	50	50
14	16	100	100	100	100
15	11	70	70	70	70
16	10	30	30	30	30
17	10	20	20	20	20
17	16	30	0	30	0
18	13	100	120	100	120
19	16	40	70	40	70
20	16	150	150	0	0

Tableau 81. Fiche de données de coût du stockage unitaire par période.

Indice de l'industrie	Type d'une industrie	Période1	Période 2	Période 3	Période 4
1	1	200	200	200	200
2	2	200	200	200	200

3	3	200	200	200	200
3	4	200	200	200	200
4	5	200	200	200	200
4	6	200	200	200	200
5	7	2	2	2	2
6	8	1	1	1	1
7	9	1	1	1	1
8	9	1	1	1	1
9	10	1,5	1,5	1,5	1,5
10	11	1,5	1,5	1,5	1,5
1	7	2	2	2	2
1	9	1	1	1	1
2	7	2	2	2	2
2	9	1	1	1	1
3	8	1	1	1	1
3	9	1	1	1	1
5	9	1	1	1	1
6	9	1,5	1,5	1,5	1,5
6	13	1	1	1	1
6	15	1,5	1,5	1,5	1,5
7	12	1,5	1,5	1,5	1,5
8	14	1,5	1,5	1,5	1,5
9	13	1,5	1,5	1,5	1,5
10	16	1,5	1,5	1,5	1,5
11	7	1,5	1,5	1,5	1,5
11	12	2	2	2	2
12	8	1,5	1,5	1,5	1,5
12	12	1	1	1	1
12	14	1,5	1,5	1,5	1,5
13	9	1,5	1,5	1,5	1,5
13	14	1	1	1	1
13	16	1,5	1,5	1,5	1,5
14	9	1,5	1,5	1,5	1,5
14	15	1,5	1,5	1,5	1,5
14	16	1,5	1,5	1,5	1,5
15	11	1,5	1,5	1,5	1,5
16	10	1,5	1,5	1,5	1,5
17	10	1,5	1,5	1,5	1,5
17	16	1,5	1,5	1,5	1,5
18	13	1,5	1,5	1,5	1,5
19	16	1,5	1,5	1,5	1,5
20	16	1,5	1,5	1,5	1,5
1	12	5	5	5	5

2	12	5	5	5	5
2	13	3	3	3	3
3	14	5	5	5	5
4	13	3	3	3	3
4	15	5	5	5	5
4	16	5	5	5	5

Tableau 82. Fiche de données de coût d'amortissement unitaire de procédé par période.

Indice de l'industrie	Indice d'un procédé	Période 1	Période 2	Période 3	Période 4
1	1	5	5	5	5
2	2	6	6	6	6
3	3	5	5	5	5
4	4	6	6	6	6

Tableau 83. Fiche de données de prix de vente unitaire à l'extérieur du PEI par période.

Indice de l'industrie	Indice d'un procédé	Type sortant d'un procédé	Période 1	Période 2	Période 3	Période 4
1	1	12	50	50	50	50
2	2	12	50	50	50	50
2	2	13	30	30	30	30
3	3	14	40	40	40	40
4	4	13	35	35	35	35
4	4	15	30	30	30	30
4	4	16	30	30	30	30

#### 5.4.2. La résolution

D'après la collection de données initiales illustrées dans les tableaux de la section 2.4.1, le traitement de données initiales était réalisé sous l'environnement de Matlab Version 7.8.0 R2009a, ensuite les données, qui sont traitées en format compatible avec l'environnement de GAMS Version Win32 23.8.2, étaient préparées. Lorsque les données traitées communiquent avec GAMS à travers la modélisation programmée, le solveur IBM ILOG CPLEX Version 12.4.0.0 était utilisé pour trouver la meilleure solution correspondant à notre modèle.

Les simulations numériques sont réalisées avec un PC muni de processeur du type : Intel(R) Core(TM) 2 Duo CPU, P7450, 2,13GHz.

Tableau 84. Temps de calcul.

Logiciel	Temps utilisé (seconde)
Matlab	337,964
GAMS	26,310
CPLEX	3,672
<b>Total</b>	<b>372,493</b>



Tableau 85. Statistique de modèle

<b>Nombre de variables</b>	1746
<b>Nombre de variable intégrer</b>	16
<b>Nombre d'équations</b>	798
<b>Nombre d'itérations</b>	294
<b>Valeur d'objective</b>	5123,306

Les valeurs des variables indiquées dans le Tableau 66 peuvent être déterminées après la résolution numérique de cet exemple de modèle. Parmi ces variables, les quantités des flux d'échange entre les industries intérieures au PEI sont représentées par les variables de type  $XS_{j,i,t}^{kj,ki}$  et de type  $XTT_{j,i,t}^{kj,ki,p}$ .

$XS_{j,i,t}^{kj,ki}$  signifie la quantité d'un flux d'échange de type  $ki$  de l'industrie  $i$  pour remplacer le type  $kj$  de l'industrie  $j$  pendant la période  $t$  sans les processus de traitement, voir le Tableau 86.

$XTT_{j,i,t}^{kj,ki,p}$  signifie la quantité d'un flux d'échange de type  $ki$  de l'industrie  $i$  pour remplacer le type  $kj$  de l'industrie  $j$  pendant la période  $t$  avec le processus de traitement  $p$ , voir le Tableau 87.

Tableau 86. Variable XS (les variables XS sont nulles par défaut).

<b>Variable XS (j. kj. t. i. ki): de i à j.</b>	<b>Valeur</b>
1.7 .2.5 .7	100
1 .7 .3.5 .7	100
1 .7 .3.6 .8	33,333
2 .7 .4.5 .7	100
6 .9 .4.7 .9	100
6 .9 .4.8 .9	150
11.7 .1.5 .7	100
12.8 .3.6 .8	166,667
13.9 .1.7 .9	100
13.9 .2.7 .9	100
13.9 .2.8 .9	150
13.9 .3.7 .9	100
15.11.1.10.11	80
15.11.4.10.11	240
17.10.4.9 .10	200

Tableau 87. Variable XTT (les variables XTT sont 0 par défaut.)

Variable XTT (j. kj. t. i. ki): de i à j.	Valeur
7 .12.1.2.13	66,667
7 .12.2.2.13	66,667
7 .12.3.1.12	540
7 .12.3.4.13	133,333
7 .12.4.1.12	180
7 .12.4.2.13	66.667
9 .13.3.4.13	98,104
9 .13.3.4.15	120
9 .13.4.4.13	115
9 .13.4.4.15	73,333
10.16.4.3.14	50
11.12.1.2.13	6,667
11.12.2.2.13	6,667
11.12.3.4.13	60
11.12.4.2.12	108
11.12.4.2.13	53,333
12.12.1.2.12	127,5
12.12.1.2.13	6,667
12.12.2.2.12	19,5
12.12.2.2.13	10
12.12.3.4.13	84,444
12.12.4.4.13	10
13.16.2.3.14	155
13.16.3.3.14	30
13.16.4.3.14	30
14.16.2.3.14	175
14.16.3.3.14	50
14.16.4.3.14	50
17.16.4.3.14	125
18.13.3.4.15	69,594
18.13.4.4.15	22,667
19.16.2.3.14	35
19.16.3.3.14	145
19.16.4.3.14	35
20.16.2.3.14	75
20.16.2.4.16	58,496
20.16.3.3.14	125
20.16.3.4.16	0,434
20.16.4.4.16	119,566

### 5.4.3. Analyse et amélioration de la résolution

Si nous supposons que les variables des échanges du type XTT et du type XS sont du type des entiers, nous pouvons avoir les résultats suivants. Les valeurs des variables indiquées dans le Tableau 66 peuvent être déterminées après la résolution numérique de cet exemple de modèle pour comprendre la situation de ce PEI, par exemple les valeurs du type XTT et du type XS sont pour comprendre la situation d'échange entre les industries intérieures de parc et elles sont présentées dans le Tableau 90 et le Tableau 91.

Tableau 88. Temps de calcul.

Logiciel	Temps utilisé (seconde)
Matlab	337,964
GAMS	33,224
CPLEX	3,493
<b>Total</b>	<b>374,681</b>

Tableau 89. Statistique de modèle

<b>Nombre de variables</b>	1746
<b>Nombre de variable intégrér</b>	280
<b>Nombre d'équations</b>	798
<b>Nombre d'itérations</b>	155
<b>Valeur d'objective</b>	5116

En conclure, la situation du PEI est présentée par les variables qui sont résumées dans le Tableau 66. Précisément, les variables suivantes peuvent être déterminées :

- Les quantités des processus des industries intérieures au PEI :  $XTP_{i,t}^{kip,p}$ ,  $XT_{i,t}^{ki,p}$ ,  $Z_{i,t}^p$ .
- Les quantités des flux d'échange entre les industries intérieures au PEI :  $XTT_{j,i,t}^{kj,ki,p}$ ,  $XS_{j,i,t}^{kj,ki}$ .
- Les quantités des flux d'échange concernant l'extérieure du PEI :  $XIPS_{i,t}^{kip,p}$ ,  $XD_{i,t}^{ki}$ ,  $YD_{j,t}^{ki}$ .
- Les variables de transport :  $TC_{i,t}$ ,  $TSD_{j,i,t}^{kj,ki}$ ,  $TED_{i,j,t}^{ki,kj}$ ,  $TS_{j,i,t}^{kj,ki}$ ,  $TE_{i,j,t}^{ki,kj}$ .
- Les variables de stockage :  $XI_{i,t}^{ki}$ ,  $XIP_{i,t}^{kip,p}$ .

Tableau 90. Variable XS (les variables XS sont 0 par défaut).

Variable XS (j. kj. t. i. ki): de i à j.	Valeur
1 .7 .3.5 .7	100

1 .7 .3.6 .8	100
1 .7 .4.5 .7	100
1 .9 .2.8 .9	50
1 .9 .4.7 .9	100
1 .9 .4.8 .9	100
2 .7 .4.5 .7	100
3 .8 .3.6 .8	67
5 .9 .2.7 .9	100
6 .9 .2.7 .9	100
6 .9 .2.8 .9	100
6 .9 .3.7 .9	100
11.7 .3.6 .8	33
11.7 .4.5 .7	100
13.9 .4.8 .9	50
15.11.1.10.11	80
15.11.2.10.11	60
15.11.3.10.11	100
15.11.4.10.11	80
16.10.2.9 .10	100
16.10.4.9 .10	50
17.10.3.9 .10	50

Tableau 91. Variable XTT (les variables XTT sont 0 par défaut.)

<b>Variable XTT (j. kj. t. i. ki): de i à j.</b>	<b>Valeur</b>
7.12.1.1.12	60
7.12.1.2.13	71
7.12.2.1.12	100
7.12.2.2.13	62
7.12.3.1.12	100
7.12.3.2.12	40
7.12.3.2.13	33
7.12.3.4.13	100
7.12.4.1.12	80
7.12.4.2.13	64
7.12.4.4.13	3
9.13.3.4.13	100
9.13.3.4.15	100
9.13.4.4.13	100
9.13.4.4.15	93
10.16.2.3.14	100
10.16.3.3.14	100
10.16.4.3.14	30
11.12.1.2.12	15

11.12.1.2.13	6
11.12.2.1.12	100
11.12.2.2.13	6
11.12.3.1.12	80
11.12.3.2.12	100
11.12.3.4.13	89
11.12.4.1.12	100
11.12.4.2.13	23
12.12.1.2.13	16
12.12.2.1.12	100
12.12.3.2.12	100
12.12.3.4.13	84
12.12.4.4.13	10
13.16.2.3.14	15
13.16.3.3.14	100
13.16.4.3.14	30
14.16.2.3.14	100
14.16.3.3.14	25
14.16.4.3.14	25
17.16.2.3.14	100
17.16.3.3.14	10
17.16.4.3.14	30
17.16.4.4.16	19
18.13.3.4.15	89
18.13.4.4.13	13
18.13.4.4.15	2
19.16.2.3.14	35
19.16.3.3.14	80
19.16.4.3.14	100
20.16.2.3.14	100
20.16.2.4.16	58
20.16.4.3.14	100
20.16.4.4.16	100

D'après les valeurs des variable  $XTT(i,ki,t,j,kj)$  dans le Tableau 91 et les valeurs des variables  $XS(i,ki,t,j,kj)$  dans le Tableau 91, les niveaux d'interaction entre les industries peuvent être calculés.

Les paramètres  $rclient_{j,i}$  représentent, pour une industrie de type client, j, le niveau d'interaction avec une industrie source, i, par rapport à les autres industries sources, voir l'équation 59. Les valeurs précises de  $rclient_{j,i}$  de cet exemple sont dans le

Tableau 92. Par exemple, pour l'industrie 1, le fournisseur le plus important est l'industrie 5.

Le même principal pour les paramètres  $rsource_{i,j}$  qui représentent, pour une industrie source, i, le niveau d'interaction avec une industrie client, j, par rapport à les autres industries clients, voir l'équation 60.

$$\forall i \in I, j \in I, rclient_{j,i} = \frac{\sum_{ki, kj \in K, t \in T} (XTT_{j,i,t}^{kj,ki} + XS_{j,i,t}^{ki})}{\sum_{kj, kl \in K, t \in T, l \in I} (XTT_{j,l,t}^{kj,kl} + XS_{j,l,t}^{kl})} \quad \text{Équation 59}$$

$$\forall i \in I, j \in I, rsource_{i,j} = \frac{\sum_{ki, kj \in K, t \in T} (XTT_{j,i,t}^{kj,ki} + XS_{j,i,t}^{ki})}{\sum_{kj, kl \in K, t \in T, l \in I} (XTT_{l,i,t}^{kl,ki} + XS_{l,i,t}^{kl})} \quad \text{Équation 60}$$

Tableau 92. Niveau de « Relation Client-Source », rclient.

Industrie Client\Industrie Source	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	/	/	/	/	<b>0,36</b>	0,18	0,18	0,28	/	/
2	/	/	/	/	<b>1</b>	/	/	/	/	/
3	/	/	/	/	/	<b>1</b>	/	/	/	/
5	/	/	/	/	/	/	<b>1</b>	/	/	/
6	/	/	/	/	/	/	<b>0,67</b>	0,33	/	/
7	<b>0,47</b>	0,39		0,14	/	/	/	/	/	/
9	/	/	/	<b>1</b>	/	/	/	/	/	/
10	/	/	<b>1</b>		/	/	/	/	/	/
11	<b>0,44</b>	0,22	/	0,13	0,16	0,05	/	/	/	/
12	0,32	<b>0,37</b>	/	0,31	/	/	/	/	/	/
13	/	/	<b>0,74</b>	/	/	/	/	0,26	/	/
14	/	/	<b>1</b>	/	/	/	/	/	/	/
15	/	/	/	/	/	/	/	/	/	<b>1</b>
16	/	/	/	/	/	/	/	/	<b>1</b>	/
17	/	/	<b>0,67</b>	0,09	/	/	/		0,24	/
18	/	/	/	<b>1</b>	/	/	/	/	/	/
19	/	/	<b>1</b>	/	/	/	/	/	/	/
20	/	/	<b>0,56</b>	0,44	/	/	/	/	/	/

---

De plus, d'après les valeurs des variables  $XD_{i,t}^{ki}$ , dans ce PEI, nous pouvons souligner que le type du matériel 6 n'était pas du tout recyclé à l'intérieur du PEI. Nous pouvons également souligner que la fourniture du matériel du type 9 est fortement insuffisante à l'intérieur du PEI par rapport aux demandes selon les valeurs des variables  $YD_{j,t}^{ki}$ . Les informations sont utiles pour le développement futur du PEI.

---

## **Chapitre6. Modélisation d'un parc éco-industriel général multi-période, modèle III.**



---

---

---

---

## 6.1. Introduction et conception de la modélisation

L'objectif de ce modèle est de maximiser la quantité totale des échanges de flux dans un parc éco-industriel afin de réduire ses impacts négatifs sur l'environnement, tout en garantissant les performances économiques des organisations participantes.

La conception de modèle III est basée sur celle de modèle II. Une industrie peut être considérée en tant qu'industrie fournisseur et industrie client. La partie de processus de traitement est programmée pour les industries de type <<fournisseur>> et également de type <<client>>. Les trois options suivantes étaient prises en compte et ajoutées dans la modélisation de modèle III : l'option de remplacement de matériel, noté comme 'Option Matériel Remplacement' ; l'option de processus de traitement pour les flux sortants, noté comme 'Option Traitement S' ; et l'option de partage de coût de transport, noté comme 'Option Transport Partage'. Le modèle III est également dynamique au niveau de temps. Les paramètres peuvent être flexibles durant les différentes périodes, par exemple, le prix unitaire de vente d'un matériel d'une industrie peut varier d'un trimestre à un autre.

En ce qui concerne un échange, la quantité et les aspects économiques devraient être concernés. L'aspect quantitatif consiste essentiellement à plusieurs capacités à respecter. L'aspect économique concerne pratiquement le prix de vente, les investissements des processus et les coûts des transports. Tous les aspects sont estimés, calculés et intégrés dans le modèle.

Au contraire de Modèle II, la possibilité d'auto-recyclage est incluse dans le modèle III. De plus, dans le Modèle II, seules les industries fournisseurs peuvent avoir les possibilités des traitements des matériaux. Ceci signifie qu'après réception d'un flux de matériel, les industries clients ne peuvent les utiliser que directement. Dans le Modèle III, l'option de processus de traitement pour les flux entrants est ajoutée, noté comme 'Option Traitement E'.

Tableau 93. Un résumé de différences entre Modèle II et Modèle III.

	<b>Modèle II</b>	<b>Modèle III</b>
Double rôles d'une industrie (fournisseur et client)	Oui	Oui
Option Matériel Remplacement	Oui	Oui
Option Traitement S	Oui	Oui
Option Transport Partage	Oui	Oui
Stockage	Oui	Oui
Contact avec des industries extérieures	Oui	Oui
Multi-périodes	Oui	Oui
Option Traitement E	Non	Oui
Auto-recyclage	Non	Oui

---

### 6.1.1. Option du remplacement de matériel

L'identification d'un flux de matière ou d'énergie est important mais difficile pour les développements des PEIs et il semble improbable que les flux d'échange puissent satisfaire complètement les besoins des industries bénéficiaires dans la réalité [161].

L'objectif de ce modèle est d'encourager la formation du potentiel PEI. En outre les échanges de types identiques, les flux d'échange peuvent être également atteints si le type de débit pourrait être remplacé par des autres types différents selon les industries avec ou sans processus de traitement. Par exemple, le charbon dérivé de cendre volante peut remplacer le calcaire.

Par conséquent, entre une industrie  $i$  qui a un flux de type  $k_i$  et une deuxième industrie qui a besoin d'un flux de type  $k_j$  pour sa production, il pourrait y avoir un flux d'échange si  $k_j$  pourrait être remplacé par  $k_i$  ou ces deux types sont identiques. En raison des différentes natures de ces deux types, l'ajustement de la quantité doit être considéré. Dans le modèle, les paramètres  $\alpha_{j,i}^{k_j,k_i}$  ont donc été utilisés, ce qui signifie qu'une unité de  $k_j$  pourrait être remplacée par  $\alpha_{j,i}^{k_j,k_i}$  unité de  $k_i$ .

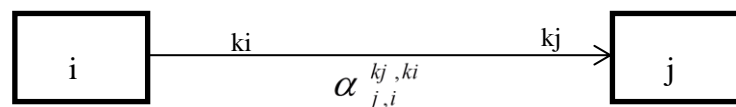


Figure 46. Un flux d'échange du type  $k_i$  de l'industrie  $i$  pour remplacer le type  $k_j$  de l'industrie  $j$ .

### 6.1.2. Option du processus de traitement pour les flux sortants/entrants

Comme mentionné précédemment dans la section 5.1.2, certains processus de traitement pourraient être nécessaires pour réaliser un échange entre les industries  $i$  et  $j$ . Les processus pourraient être faits par une industrie  $i$  à la condition que la technique est disponible et l'aspect économique est respecté.

Dans la littérature, les types communs à recycler et réutiliser sont, en général, le gypse, le CO<sub>2</sub>, la cendre, la boue, et la biomasse.

Par exemple, pour le gypse [162] [163] [164], pour la cendre [165] [166] [167] [168], pour la boue [169] [170] [171] [172], pour la biomasse [173] [174] [175] [176], pour le CO<sub>2</sub> [159] [81].

---

### 6.1.3. Option du partage du coût de transport

Le coût de transport est très important pour réaliser un échange de flux. Ce coût sera payé par l'une des industries relatives, suivant l'une des règles suivantes :

- En situation FOB (en anglais : Free On Board ; en français : Sans Frais à Bord).
- En situation CIF (en anglais : Cost Insurance Freight ; en français : Coût Assurance Fret).

Dans ce travail, une conception du partage des coûts de transport a été proposée et intégrée dans ce modèle. La proportion du coût qu'une industrie relative doit payer pourrait être décidée par le modèle. Par conséquent, un flux d'échange potentiel de  $i$  à  $j$  pourrait être une combinaison des options des processus des traitements et des options de partage des coûts des transports.

## 6.2. Analyse et modélisation de l'industrie $i$

Chaque secteur d'activité est un élément essentiel d'un parc éco-industriel potentiel. Il pourrait être considéré comme un organisme agissant pour un système de la symbiose industrielle et pour un PEI avec ses flux des entrées et des sorties.

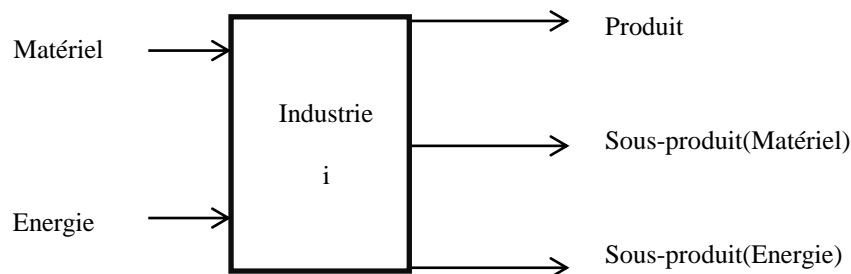


Figure 47. Illustration de l'analyse des flux de l'industrie  $i$ .

Les quatre parties de la composite de l'industrie  $i$  peuvent se communiquer entre elles et elles sont :

- La partie « Industrie  $i$  ».
- La partie « Procédés pour traiter des flux entrants de  $i$ , PE ». Chaque procédé possède un produit principal et des sous-produits.
- La partie « Procédés pour traiter des flux sortants de  $i$ , PS ». Chaque procédé possède un produit principal et des sous-produits.
- La partie « Stockage de  $i$  ».

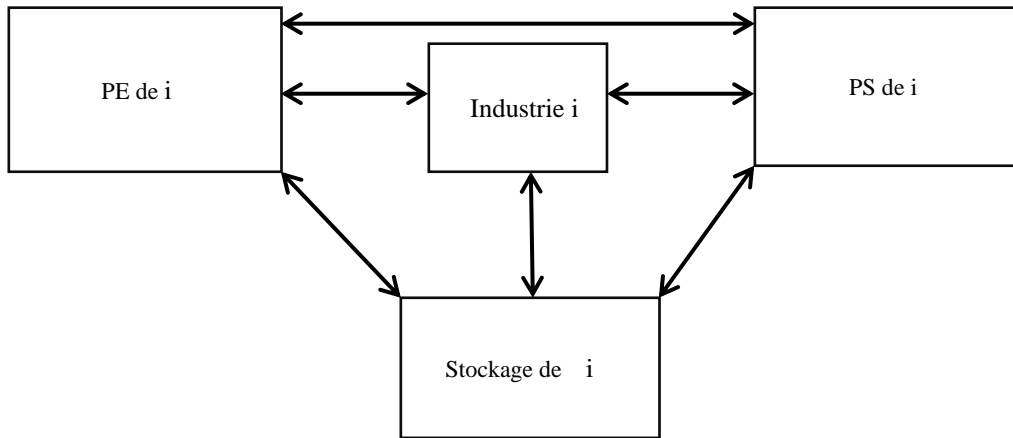


Figure 48. Les quatre parties de la composition de l'industrie i.

Tableau 94. Ensemble primaire du modèle.

Symbol	Explication
$I$	Industries à l'intérieur d'un PEI.
$T$	Périodes considérées.
$K$	Types de sous-produits à l'intérieur d'un PEI.
$P$	Procédés de traitements à l'intérieur d'un PEI.

### 6.2.1. Modélisation de la partie « Industrie i »

#### 6.2.1.1. Conception, hypothèse, variables et paramètres

Pour un flux sortant du type sous-produit matériel, les quatre différentes parties des traitements de ce flux sont :

- Il pourrait être traité directement, par exemple, à l'usine d'origine, à l'usine de traitement des déchets.
- Il pourrait être envoyé à la zone de son stockage.
- Il pourrait être vendu directement aux industries intérieures au PEI.
- Il pourrait être envoyé à un procédé de traitement, PE ou PS, dans l'industrie i

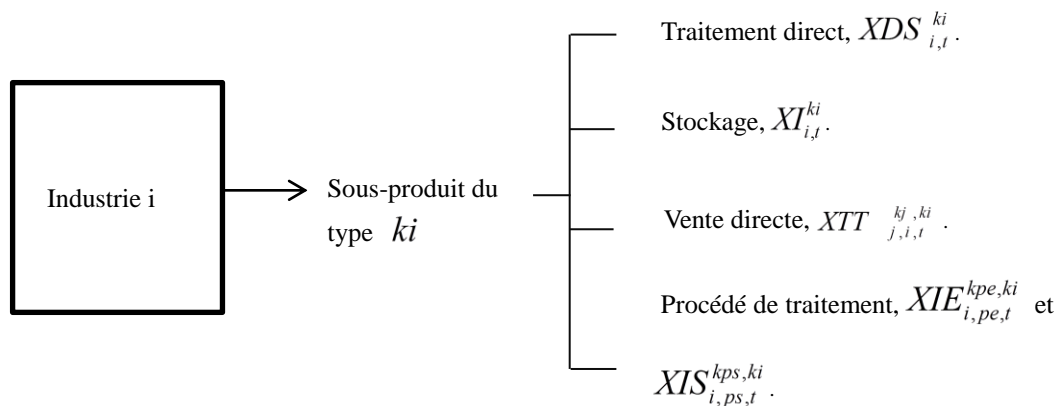


Figure 49. Les possibilités de traitement du sous-produit du type  $ki$  de l'industrie i.

Pour un flux du type matériel d'entrée, une industrie peut l'obtenir de quatre façons différentes, soient:

- Il pourrait être réalisé venant des industries extérieures au PEI.
- Il peut être obtenu à partir de son propre stockage.
- Il peut être obtenu à partir de ses procédés de traitement, PE ou PS.
- Il pourrait être acquis par les industries intérieures au PEI.

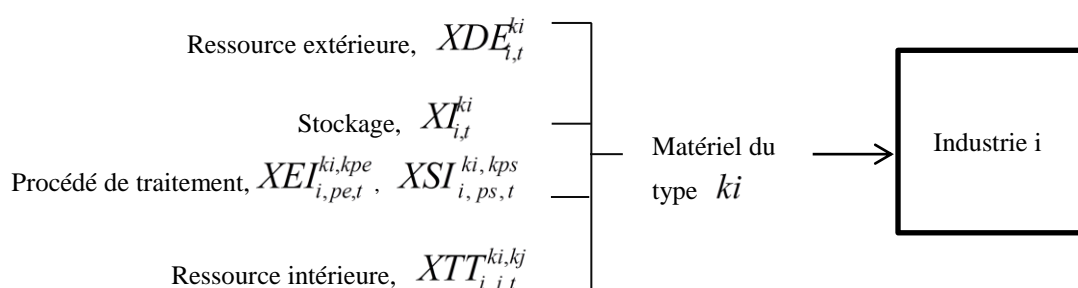


Figure 50. Les possibilités d'acquisition du matériel premier de l'industrie j.

Les variables et les paramètres sont illustrés en détail dans les tableaux suivants.

Tableau 95. Variables de la partie « Industrie i ».

Symbol	Explication	Type	Unité
$XDS_{i,t}^{ki}$	La quantité du flux sortant du type ki de l'industrie i qui sera traité directement pendant une période t.	$R^+$	kg
$XI_{i,t}^{ki}$	La quantité du flux sortant du type ki de l'industrie i qui sera envoyé à son stockage au cours d'une période t.	$R^+$	kg
$XIE_{i,pe,t}^{kpe,ki}$	La quantité du flux d'échange du type ki de l'industrie i à un des procédés des traitements pe pour remplacer le type kpe au cours d'une période t. Les types ki et kpe peuvent être identiques.	$R^+$	kg
$XIS_{i,ps,t}^{kps,ki}$	La quantité du flux d'échange du type ki de l'industrie i à un des procédés des traitements ps pour remplacer le type kps au cours d'une période t. Les types ki et kps peuvent être identiques.	$R^+$	kg
$XTT_{j,i,t}^{kj,ki}$	La quantité du flux d'échange du type ki de l'industrie i à une autre industrie j pour remplacer le type kj au cours de la période t.	$R^+$	kg
$XDE_{i,t}^{ki}$	La quantité du flux entrant du type ki de l'industrie i venant l'extérieur du PEI pendant une période t.	$R^+$	kg

$XEI_{i,pe,t}^{ki,kpe}$	La quantité du flux d'auto-recyclage du type kpe d'un des procédés des traitements pe pour remplacer le type ki dans l'industrie i au cours d'une période t. Les types ki et kpe peuvent être identiques.	$R^+$	kg
$XSI_{i,ps,t}^{ki,kps}$	La quantité du flux d'auto-recyclage du type kps d'un des procédés des traitements ps pour remplacer ki dans l'industrie i au cours d'une période t. Les types ki et kps peuvent être identiques.	$R^+$	kg

Tableau 96. Paramètres des flux sortants de l'industrie i.

Symbol	Explication	Unité
$production_{i,t}^{ki}$	La quantité du sous-produit du type ki de l'industrie i pendant une période t.	kg
$inventory_{i,1}^{ki}$	La quantité du stockage initial du type ki de l'industrie i.	kg
$demande_{i,t}^{ki}$	La quantité entrante de la demande du type ki pour la production de l'industrie i durant une période t.	kg
$pu_{i,t}^{ki}$	Le prix unitaire de vente du type ki de l'industrie i.	€/kg
$pa_{i,t}^{ki}$	Le prix unitaire d'achat du type ki de l'industrie i.	€/kg
$pup_{i,p,t}^{ki}$	Le prix unitaire de vente du type ki de l'industrie i après le procédé de traitement p.	€/kg
$pap_{i,p,t}^{ki}$	Le prix unitaire d'achat du type ki de l'industrie i pour le procédé de traitement p.	€/kg
$\alpha_{j,i}^{kj,ki}$	Le taux de conversion du flux d'échange du type ki de l'industrie i à l'industrie j pour remplacer du type kj, si le type ki pourrait être utilisé par l'industrie j à remplacer le type kj, puis une unité de kj pourrait être remplacé par $\alpha_{j,i}^{kj,ki}$ unité de ki.	/
$ui_i^{ki}$	Le volume d'une unité du type ki de l'industrie i.	$m^3$
$pi_i^{ki}$	Le prix unitaire du stockage d'une unité du type ki de l'industrie i.	€/m <sup>3</sup>

#### 6.2.1.2. Contraintes du bilan massique

Pour un flux sortant du sous-produit du type ki de l'industrie i pendant une période t, la somme de la quantité de la production et du stockage précédent est égale à la somme de ses quantités au traitement direct, à son stockage, à sa vente et à un de ses processus des traitements, soit PE ou PS, voir l'équation 62. Lors du démarrage d'un parc éco-industriel, quand  $t = 1$ , son stockage initial pourrait être intégré comme

son stockage précédent, voir l'équation 61. Les variables et les paramètres sont expliqués dans les Tableaux 95 et 96.

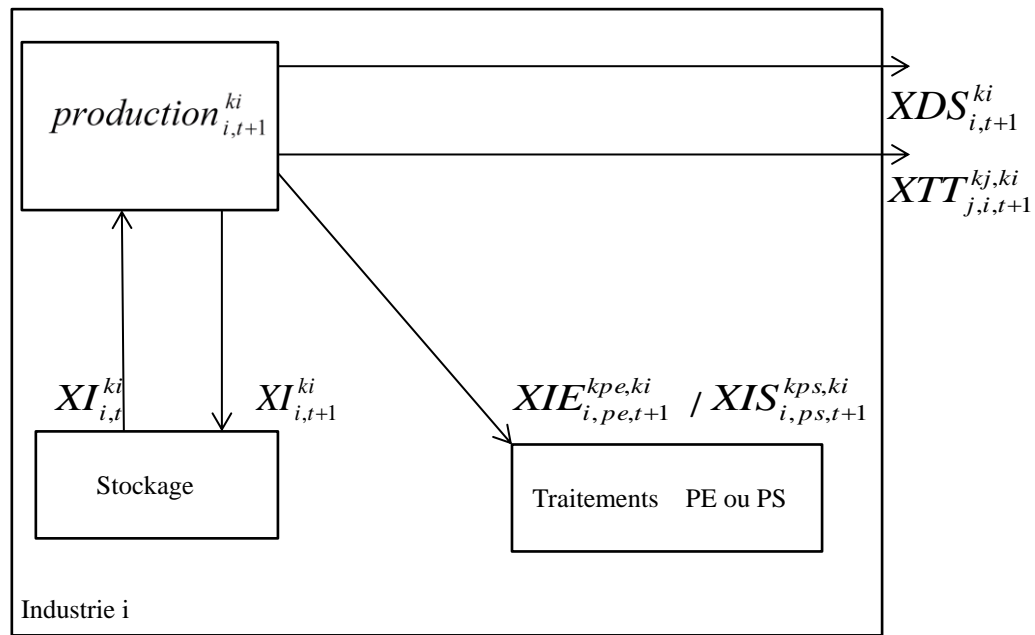


Figure 51. Illustration de la contrainte de bilan massique d'un flux sortant du type  $ki$  de l'industrie  $i$  durant une période  $t$ .

$$production_{i,1}^{ki} + inventory_i^{ki} = XDS_{i,1}^{ki} + XI_{i,1}^{ki} + \left( \sum_{pe,kpe} XIE_{i,pe,1}^{kpe,ki} \right) + \left( \sum_{ps,kps} XIS_{i,ps,1}^{kps,ki} \right) + \left( \sum_{j,kj} XTT_{j,i,1}^{kj,ki} \right) \quad \text{Équation 61}$$

$$\forall i \in I, ki \in BO_i, pe \in PE_i, ps \in PS_i, kpe \in PEI_{i,pe}, kps \in PSI_{i,ps}, j \in I_i^{ki}, kj \in PI_j$$

$$production_{i,t+1}^{ki} + XI_{i,t}^{ki} = XDS_{i,t+1}^{ki} + XI_{i,t+1}^{ki} + \left( \sum_{pe,kpe} XIE_{i,pe,t+1}^{kpe,ki} \right) + \left( \sum_{ps,kps} XIS_{i,ps,t+1}^{kps,ki} \right) + \left( \sum_{j,kj} XTT_{j,i,t+1}^{kj,ki} \right) \quad \text{Équation 62}$$

$$\forall i \in I, ki \in BO_i, pe \in PE_i, ps \in PS_i, kpe \in PEI_{i,pe}, kps \in PSI_{i,ps}, j \in I_i^{ki}, kj \in PI_j, t \in [1, |T| - 1]$$

Pour un flux entrant du type  $ki$  de l'industrie  $i$  pour une période  $t$ , la différence de la quantité d'entrée et du stockage précédent est égale à la somme de ses quantités des ressources venant de l'extérieur de PEI, de son stockage, des ressources intérieures au PEI qui pourraient être utilisées directement et des procédés des traitements, soit PE ou PS, voir l'équation 64. Lors du démarrage de l' PEI, quand  $t = 1$ , son stockage



initial pourrait être intégré comme son stockage précédent, voir l'équation 63. Les variables et les paramètres sont expliqués dans les Tableaux 95 et 96.

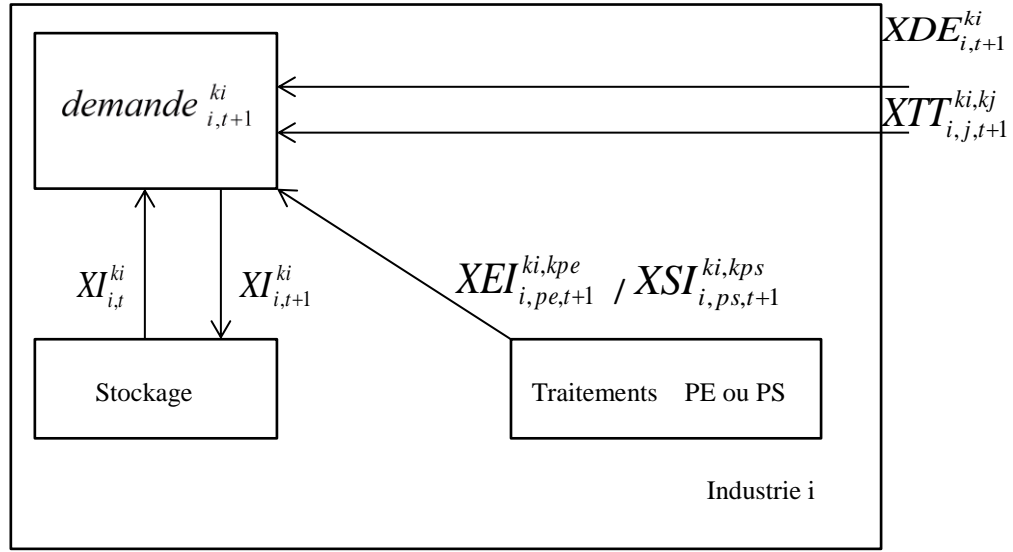


Figure 52. Illustration de la contrainte de bilan massique d'un flux entrant du type  $ki$  de l'industrie  $i$  durant une période  $t$ .

$$demande_{i,1}^{ki} + inventory_i^{ki} + XI_{i,1}^{ki} = XDE_{i,1}^{ki} + \left( \sum_{pe,kpe} \alpha_{i,pe}^{ki,kpe} XIE_{i,pe,1}^{ki,kpe} \right) + \left( \sum_{ps,kps} \alpha_{i,ps}^{ki,kps} XSI_{i,ps,1}^{ki,kps} \right) + \left( \sum_{j,kj} \alpha_{i,j}^{ki,kj} XTT_{i,j,1}^{ki,kj} \right)$$

$$\forall i \in I, ki \in BI_i, pe \in PE_i, ps \in PS_i, kpe \in PEO_{i,pe}, kps \in PSO_{i,ps}, j \in J_i^{ki}, kj \in PO_j$$

Équation 63

$$demande_{i,t+1}^{ki} + inventory_i^{ki} + XI_{i,t+1}^{ki} = XDE_{i,t+1}^{ki} + \left( \sum_{pe,kpe} \alpha_{i,pe}^{ki,kpe} XIE_{i,pe,t+1}^{ki,kpe} \right) + \left( \sum_{ps,kps} \alpha_{i,ps}^{ki,kps} XSI_{i,ps,t+1}^{ki,kps} \right) + \left( \sum_{j,kj} \alpha_{i,j}^{ki,kj} XTT_{i,j,t+1}^{ki,kj} \right)$$

$$\forall i \in I, ki \in BI_i, pe \in PE_i, ps \in PS_i, kpe \in PEO_{i,pe}, kps \in PSO_{i,ps}, j \in J_i^{ki}, kj \in PO_j, t \in [1, |T| - 1]$$

Équation 64

Tableau 97. Ensembles de bilan massique de la modélisation de la partie « Industrie i ».

Symbol	Explication
$PE_i$	Les procédés des traitements des flux entrants de l'industrie i, $i \in I$ .
$PS_i$	Les procédés des traitements des flux sortants de l'industrie i, $i \in I$ .
$PEI_{i,pe}$	Les types entrants du procédé pe de l'industrie i, $i \in I$ , $pe \in PE_i$ .
$PSI_{i,ps}$	Les types entrants du procédé ps de l'industrie i, $i \in I$ , $ps \in PS_i$ .
$PEO_{i,pe}$	Les types sortants du procédé pe de l'industrie i, $i \in I$ , $pe \in PE_i$ .
$PSO_{i,ps}$	Les types sortants du procédé ps de l'industrie i, $i \in I$ , $ps \in PS_i$ .
$J_i^{ki}$	Les industries fournisseurs potentiels du type ki de l'industrie i, $i \in I$ , $ki \in BO_i$ .
$I_i^{ki}$	Les industries clients potentiels à acheter le type ki de l'industrie i, $i \in I$ , $ki \in BO_i$ .
$PO_j$	Les types sortants de l'industrie j, $j \in J_i^{ki}$ .
$PI_j$	Les types entrants de l'industrie j, $j \in I_i^{ki}$ .

### 6.2.1.3. Contraintes de la performance économique

Pour une industrie i, la performance économique sans participation d'un PEI,  $EBOref_i$  et  $EBIref_i$ , peut être vue comme les références, voir les équations 65 et 66. La performance économique des flux entrants de l'industrie i,  $EBI_i$ , et la performance économique des flux sortants de l'industrie i,  $EBO_i$ , sont présentées dans les équations 67 et 68. Les variables et les paramètres sont expliqués dans les Tableaux 95 et 96.

$$EBOref_i = -\left(\sum_{ki,t} production_{i,t}^{ki} \times pp_{i,t}^{ki}\right) \quad \text{Équation 65}$$

$$\forall i \in I, ki \in BO_i, t \in T$$

$$EBIref_i = -\left(\sum_{ki,t} demande_{i,t}^{ki} \times pp_{i,t}^{ki}\right) \quad \text{Équation 66}$$

$$\forall i \in I, ki \in BI_i, t \in T$$

$$\begin{aligned}
EBO_i = & -\left(\sum_{ki,t} XDS_{i,t}^{ki} \times PP_{i,t}^{ki}\right) - \left(\sum_{ki,t} XI_{i,t}^{ki} \times ui_i^{ki} \times pi_{i,t}^{ki}\right) \\
& + \left(\sum_{j,kj,ki,t} XTT_{j,i,t}^{kj,ki} \times (pu_{i,t}^{ki} + PP_{i,t}^{ki})\right) \\
& + \left(\sum_{pe,kpe,ki,t} XIE_{i,pe,t}^{kpe,ki} \times (PP_{i,t}^{ki} + \alpha_{i,i}^{kpe,ki} \times pap_{i,pe,t}^{kpe})\right) \\
& + \left(\sum_{ps,kps,ki,t} XIS_{i,ps,t}^{kps,ki} \times (PP_{i,t}^{ki} + \alpha_{i,i}^{kps,ki} \times pap_{i,ps,t}^{kps})\right)
\end{aligned}$$

Équation67

$\forall i \in I, ki \in BO_i, pe \in PE_i, ps \in PS_i, kpe \in PEI_{i,pe}, kps \in PSI_{i,ps}, j \in I_i^{ki}, kj \in PI_j, t \in T.$

$$\begin{aligned}
EBI_i = & -\left(\sum_{ki,t} XDE_{i,t}^{ki} \times pa_{i,t}^{ki}\right) - \left(\sum_{ki,t} XI_{i,t}^{ki} \times ui_i^{ki} \times pi_{i,t}^{ki}\right) \\
& - \left(\sum_{j,kj,ki,t,pj} XTT_{i,j,t}^{ki,kj} \times (pa_{j,t}^{kj} + pap_{j,pj,t}^{kj})\right) \\
& + \left(\sum_{pe,kpe,ki,t} XEI_{i,pe,t}^{ki,kpe} \times (PP_{i,pe,t}^{kpe} + \alpha_{i,i}^{ki,kpe} \times pa_{i,t}^{ki})\right) \\
& + \left(\sum_{ps,kps,ki,t} XSI_{i,ps,t}^{ki,kps} \times (PP_{i,t}^{kps} + \alpha_{i,i}^{ki,kps} \times pa_{i,t}^{ki})\right) \\
& + \left(\sum_{pe,kprincipal eE,ki,t} XEI_{i,pe,t}^{ki,kprincipal eE} \times (-pup_{i,pe,t}^{kprincipal eE} + \alpha_{i,i}^{ki,kprincipal eE} \times pa_{i,t}^{ki})\right) \\
& + \left(\sum_{ps,kprincipal eS,ki,t} XSI_{i,ps,t}^{ki,kprincipal eS} \times (-pup_{i,ps,t}^{kprincipal eS} + \alpha_{i,i}^{ki,kprincipal eS} \times pa_{i,t}^{ki})\right)
\end{aligned}$$

Équation 68

$\forall i \in I, ki \in BI_i, pe \in PE_i, ps \in PS_i, kpe \in PEO_{i,pe}, kps \in PSO_{i,ps}, j \in J_i^{ki}, kj \in PO_j, t \in T, kprincipal eE \in PEO_{i,pe}, kprincipal eS \in PSO_{i,ps}, pj \in P_j.$

## 6.2.2. Modélisation de la partie « PE »

### 6.2.2.1. Contraintes du bilan massique

Pour un flux de sortie de type  $ki$  d'un procédé  $pe$  de l'industrie  $i$ , si le processus  $pe$  existe, la quantité au processus que son flux d'entrée, qui vient de lui-même, doit être limitée par sa capacité de traitement. En outre, si des flux d'entrée de cette  $pe$  processus impliquent industries alternatives intérieur  $PEI$ , ses quantités devraient également être limitées. Pour un flux de sortie après un processus de l'industrie  $i$ , son équilibre de flux pourrait être contrôlé. Les variables et les paramètres sont expliqués dans les Tableaux 98 et 99.

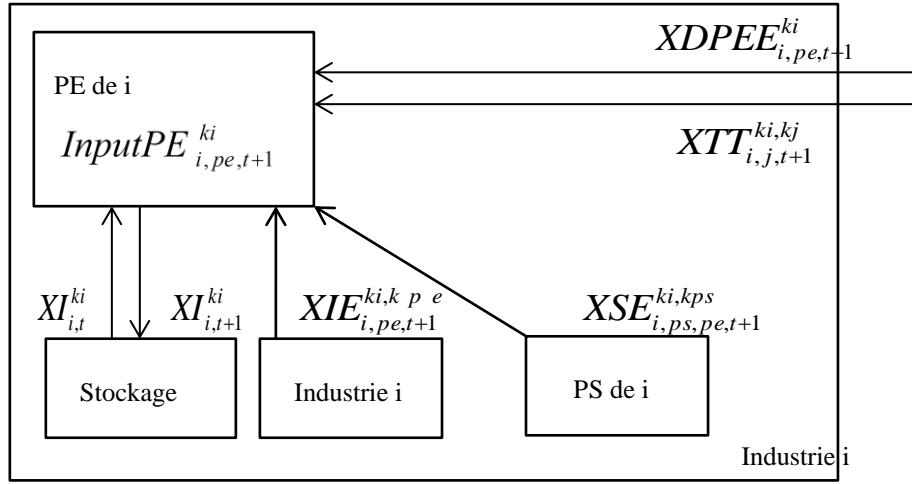


Figure 53. Illustration de l'entrée du processus de traitement pe de l'industrie i.

$$\begin{aligned}
 InputPE_{i,pe,1}^{ki} - inventory_i^{ki} + XI_{i,1}^{ki} = XDPEE_{i,pe,1}^{ki} + \left( \sum_{j,kj} \alpha_{i,j}^{ki,kj} XTT_{i,j,1}^{ki,kj} \right) + \\
 \left( \sum_{kpe} \alpha_{i,i}^{ki,kpe} XIE_{i,pe,1}^{ki,kpe} \right) + \left( \sum_{ps,kps} \alpha_{i,i}^{ki,kps} XSE_{i,ps,pe,1}^{ki,kps} \right)
 \end{aligned}
 \tag{Equation 69}$$

$$\forall i \in I, pe \in PE_i, kpe \in BO_i, j \in J_i^k, kj \in PO_j, ps \in PS_i, kps \in (PSO_{i,ps} \cup TPS_{i,ps})$$

$$\begin{aligned}
 InputPE_{i,pe,t+1}^{ki} - XI_{i,t}^{ki} + XI_{i,t+1}^{ki} = XDPEE_{i,pe,t+1}^{ki} + \left( \sum_{j,kj} \alpha_{i,j}^{ki,kj} XTT_{i,j,t+1}^{ki,kj} \right) + \\
 \left( \sum_{kpe} \alpha_{i,i}^{ki,kpe} XIE_{i,pe,t+1}^{ki,kpe} \right) + \left( \sum_{ps,kps} \alpha_{i,i}^{ki,kps} XSE_{i,ps,pe,t+1}^{ki,kps} \right)
 \end{aligned}
 \tag{Equation 70}$$

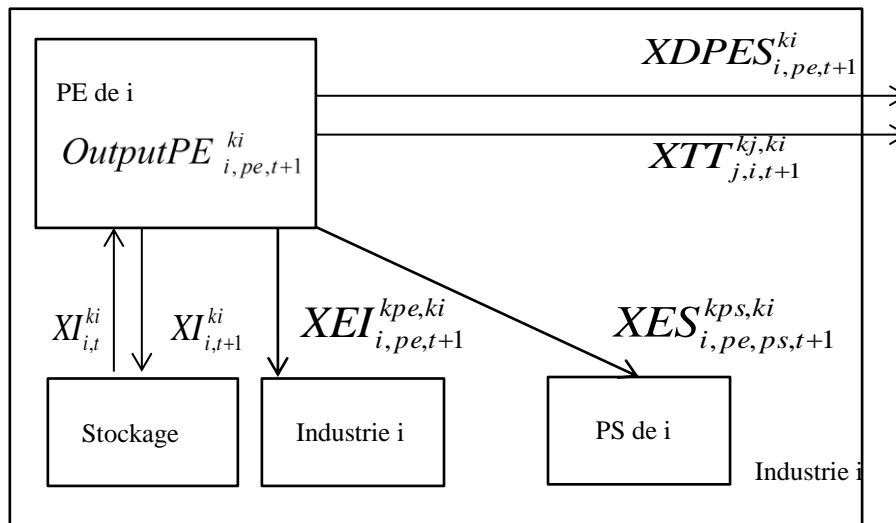


Figure 54. Illustration de la sortie du processus de traitement pe de l'industrie i.

$$\begin{aligned}
OutputPE_{i,pe,1}^{ki} + inventory_i^{ki} &= XDPE_{i,pe,1}^{ki} + \left( \sum_{j,kj} XTT_{j,i,1}^{kj,ki} \right) \\
&+ \left( \sum_{kpe} XEI_{i,pe,1}^{ki,kpe} \right) + \left( \sum_{ps,kps} XES_{i,pe,ps,1}^{kps,ki} \right) + XI_{i,1}^k
\end{aligned}$$

Équation 71

$$\forall i \in I, pe \in PE_i, ki \in (PEO_{i,pe} \cup TPE_{i,pe}), kpe \in BI_i, j \in J_i^{ki}, kj \in PI_j, ps \in PS_i, kps \in PSI_{i,ps}$$

$$\begin{aligned}
OutputPE_{i,pe,t+1}^{ki} + XI_{i,t}^{ki} &= XDPE_{i,pe,1}^{ki} + \left( \sum_{j,kj} XTT_{j,i,t+1}^{kj,ki} \right) \\
&+ \left( \sum_{kpe} XEI_{i,pe,t+1}^{ki,kpe} \right) + \left( \sum_{ps,kps} XES_{i,pe,ps,t+1}^{kps,ki} \right) + XI_{i,t+1}^k
\end{aligned}$$

Équation 72

$$\forall i \in I, pe \in PE_i, ki \in (PEO_{i,pe} \cup TPE_{i,pe}), kpe \in BI_i, j \in J_i^{ki}, kj \in PI_j, ps \in PS_i, kps \in PSI_{i,ps}, t \in [1, |T| - 1]$$

Tableau 98. Variables de la partie « PE ».

Symbol	Explication	Type	Unité
$XES_{i,pe,ps,t}^{kps,ki}$	La quantité du type kps du procédé ps de l'industrie i à remplacer le type ki du procédé pe durant la période t.	$R^+$	kg
$XSE_{i,ps,pe,t}^{ki,kps}$	La quantité du type ki du procédé pe de l'industrie i à remplacer le type kps du procédé ps durant la période t.	$R^+$	kg
$XDPEE_{i,pe,t}^{ki}$	La quantité du type ki du procédé pe de l'industrie i venant l'extérieur du PEI durant la période t.	$R^+$	Kg
$XDPE_{i,pe,t}^{ki}$	La quantité du type ki du procédé pe de l'industrie i vers l'extérieur du PEI durant la période t.	$R^+$	kg

Tableau 99. Ensembles de la modélisation de la partie « PE ».

Symbol	Explication
$TPS_{i,ps}$	Le type principale du procédé ps de l'industrie i, $i \in I, ps \in PS_i$ .
$TPE_{i,pe}$	Le type principale du procédé pe de l'industrie i, $i \in I, pe \in PE_i$ .

#### 6.2.2.2. Contraintes du contrôle d'un procédé de traitement pe

Pour un procédé de traitement du type pe de l'industrie i, ses flux d'entrée, qui viennent de lui-même ou d'autres industries intérieures au PEI, les ratios de la réaction sont fixés, voir l'équation 73. De plus, les flux de la sortie sont également fixés selon les ratios de la réaction, voir l'équation 74. La quantité totale qui pourrait être envoyée aux autres industries devrait être délimitée par sa quantité disponible

après le processus du type  $pe$ . Les variables et les paramètres sont expliqués dans les Tableaux 100 et 101.

$$InputPE_{i,pe,t}^{ki} \times ratio_{i,pe}^{ki,kprincipaleE} = OutputPE_{i,pe,t}^{kprincipaleE} \quad \text{Équation73}$$

$$\forall i \in I, pe \in PE_i, ki \in PEI_{i,pe}, kprincipaleE \in TPE_{i,pe}, t \in T.$$

$$OutputPE_{i,pe,t}^{ki} \times ratiosp_{i,pe}^{ki,kprincipaleE} = OutputPE_{i,pe,t}^{kprincipaleE} \quad \text{Équation74}$$

$$\forall i \in I, pe \in PE_i, ki \in PEO_{i,pe}, kprincipaleE \in TPE_{i,pe}, t \in T.$$

$$Z_{i,pe,t} \times ctp_{i,pe}^{kprincipaleE} \geq OutputPE_{i,pe,t}^{kprincipaleE} \quad \text{Équation75}$$

$$\forall i \in I, pe \in PE_i, kprincipaleE \in TPE_{i,pe}, t \in T.$$

Tableau 100. Paramètres de contrôle du procédé  $pe$  de l'industrie  $i$ .

Symbol	Explication	Unité
$ratio_{i,pe}^{ki,kprincipaleE}$	Le rapport entre le type $ki$ et le type $kprincipaleE$ de l'industrie $i$ durant une période $t$ et $kprincipaleE$ est le principe produit de processus $pe$ de l'industrie $i$ .	/
$ratosp_{i,pe}^{ki,kprincipaleE}$	Le rapport entre le type $ki$ et le type $kprincipaleE$ de l'industrie $i$ durant une période $t$ et $kprincipaleE$ est le principe produit de processus $pe$ de l'industrie $i$ .	/
$ctp_{i,pe}^{kprincipaleE}$	La capacité de production du type $kprincipaleE$ du procédé $pe$ de l'industrie $i$ .	kg
$cpe_{i,pe,t}$	Le coût de production unitaire d'une unité de produit principale du procédé $pe$ de l'industrie $i$ durant la période $t$ .	€/kg

Tableau 101. Variable de contrôle du procédé  $pe$  de l'industrie  $i$ .

Symbol	Explication	Type
$Z_{i,pe,t}$	Une industrie $i$ durant une période $t$ utilise un processus de traitement $pe$ ou non, 1 ou 0.	$\{0,1\}$
$InputPE_{i,pe,t}^k$	La quantité d'un flux entrant de type $k$ du processus $pe$ de l'industrie $i$ pendant la période $t$ .	$R^+$
$OutputPE_{i,pe,t}^k$	La quantité d'un flux sortant de type $k$ du processus $pe$ de l'industrie $i$ pendant la période $t$ .	$R^+$

### 6.2.2.3. Contraintes de la performance économique

Pour un précédé du type  $pe$  de l'industrie  $i$ , la performance économique des flux entrants,  $EPEI_i$ , et la performance économique des flux sortants,  $EPEO_i$ , sont présentées dans les équations 76 et 77. Les variables et les paramètres sont expliqués dans les Tableaux 111 et 112.

$$\begin{aligned}
 EPEI_i = & -\left(\sum_{ki,t} XI_{i,t}^{ki} \times ui_i^{ki} \times pi_{i,t}^{ki}\right) - \left(\sum_{ki,pe,t} XDPEE_{i,pe,t}^{ki} \times pap_{i,pe,t}^{ki}\right) \\
 & - \left(\sum_{kj,j,ki,t} XTT_{i,j,t}^{ki,kj} \times (pu_{j,t}^{kj} + pup_{j,pj,t}^{kj})\right) \\
 & + \left(\sum_{pe,kpe,ki,t} XIE_{i,pe,t}^{ki,kpe} \times (pp_{i,t}^{kpe} + \alpha_{i,i}^{ki,kpe} \times pap_{i,pe,t}^{ki})\right) \\
 & + \left(\sum_{ps,kps,pe,ki,t} XSE_{i,ps,pe,t}^{ki,kps} \times (ppp_{i,ps,t}^{kps} + \alpha_{i,i}^{ki,kps} \times pap_{i,pe,t}^{ki})\right) \\
 & + \left(\sum_{ps,kprincipal eS,pe,ki,t} XSE_{i,ps,pe,t}^{ki,kprincipal eS} \times (-pup_{i,ps,t}^{kprincipal eS} + \alpha_{i,i}^{ki,kprincipal eS} \times pap_{i,pe,t}^{ki})\right)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \forall i \in I, ki \in PEI_i, pe \in PE_i, kpe \in BO_i, j \in J_i, kj \in PO_j, pj \in (PE_j \cup PS_j), ps \in PS_i, \\
 kps \in PSO_{i,ps}, kprincipal eS \in TPS_{i,ps}, t \in T.
 \end{aligned}$$

Équation 76

$$\begin{aligned}
 EPEO_i = & -\left(\sum_{t,ki} XI_{i,t}^{ki} \times ui_i^{ki} \times pi_{i,t}^{ki}\right) - \left(\sum_{pe,t,ki} XDPES_{i,pe,t}^{ki} \times ppp_{i,pe,t}^{ki}\right) \\
 & + \left(\sum_{kj,j,t,ki} XTT_{j,i,t}^{kj,ki} \times pup_{i,pe,t}^{ki}\right) \\
 & + \left(\sum_{pe,kpe,t,ki} XEI_{i,pe,t}^{kpe,ki} \times (pup_{i,pe,t}^{ki} + \alpha_{i,i}^{kpe,ki} \times pa_{i,t}^{ki})\right) \\
 & + \left(\sum_{ps,kps,pe,t,ki} XES_{i,pe,ps,t}^{kps,ki} \times (ppp_{i,pe,t}^{kps} + \alpha_{i,i}^{kps,ki} \times pap_{i,ps,t}^{kps})\right) \\
 & + \left(\sum_{ps,kprincipal eE,pe,ki,kps,t} XES_{i,pe,ps,t}^{kps,kprincipal eE} \times (-pup_{i,pe,t}^{kprincipal eE} + \alpha_{i,i}^{kps,kprincipal eE} \times pap_{i,ps,t}^{kps})\right)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \forall i \in I, ki \in PEO_i, pe \in PE_i, kpe \in BI_i, j \in I_i, kj \in PI_j, ps \in PS_i, kps \in PSO_{i,ps}, \\
 kprincipal eE \in TPE_{i,pe}, t \in T.
 \end{aligned}$$

Équation 77

$$EPE_i = EPEI_i + EPEO_i - \left( \sum_{pe,t,k \text{ principal } eE} OutputPE_{i,pe,t}^{k \text{ principal } eE} \times cpe_{i,t}^{pe} \right)$$

$$\forall i \in I, pe \in PE_i, k \text{ principal } eE \in TPE_{i,pe}, t \in T.$$

Équation 78

### 6.2.3. Modélisation de la partie « PS »

#### 6.2.3.1. Contraintes du bilan massique

Pour un flux sortant du type  $ki$  d'un procédé  $ps$  de l'industrie  $i$ , si le processus  $ps$  existe, la quantité au processus que son flux d'entrée, qui vient de lui-même, doit être limitée par sa capacité de traitement. En outre, si des flux d'entrée du processus  $ps$  concernent les industries alternatives intérieures du PEI, ses quantités devraient également être limitées. Pour un flux sortant après un processus de l'industrie  $i$ , son bilan de flux pourrait être contrôlé. Les variables et les paramètres sont expliqués dans les Tableaux 102 et 103.

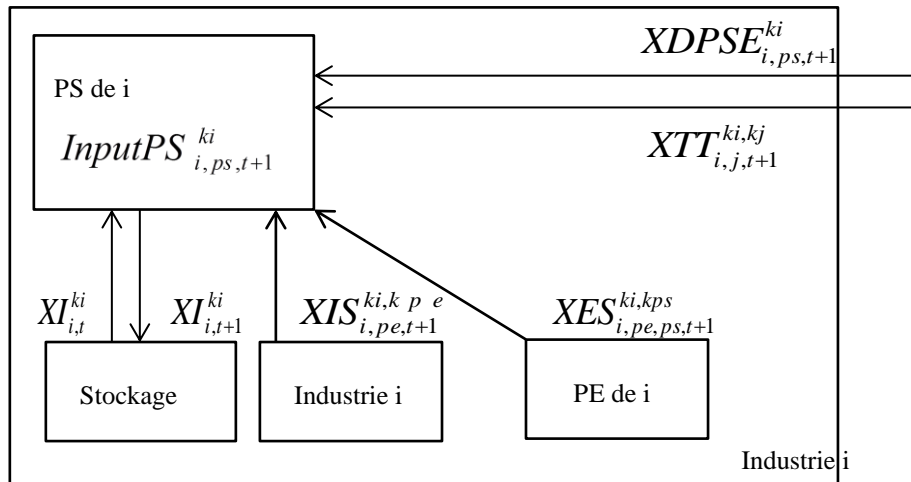


Figure 55. Illustration de l'entrée du processus de traitement  $ps$  de l'industrie  $i$ .

$$InputPS_{i,ps,1}^{ki} - inventory_i^{ki} + XI_{i,1}^{ki} = XDPSE_{i,pe,1}^{ki} + \left( \sum_{j,kj} \alpha_{i,j}^{ki,kj} XTT_{i,j,1}^{ki,kj} \right) + \left( \sum_{kps} \alpha_{i,i}^{ki,kps} XIS_{i,ps,1}^{ki,kps} \right) + \left( \sum_{pe,kpe} \alpha_{i,i}^{ki,kpe} XES_{i,pe,ps,1}^{ki,kpe} \right)$$

Équation 79

$$\forall i \in I, ps \in PS_i, kps \in BO_i, j \in J_i^{ki}, kj \in PO_j, pe \in PE_i, kpe \in (PEO_{i,pe} \cup TPE_{i,pe})$$



$$\begin{aligned}
& InputPS_{i,ps,t+1}^{ki} - XI_{i,t}^{ki} + XI_{i,t+1}^{ki} = XDPSE_{i,ps,t+1}^{ki} + \left( \sum_{j,kj} \alpha_{i,j}^{ki,kj} XTT_{i,j,t+1}^{ki,kj} \right) + \\
& \left( \sum_{kps} \alpha_{i,i}^{ki,kps} XIS_{i,ps,t+1}^{ki,kps} \right) + \left( \sum_{pe,kpe} \alpha_{i,i}^{ki,kpe} XES_{i,pe,ps,t+1}^{ki,kpe} \right)
\end{aligned}$$

Équation 80

$$\forall i \in I, ps \in PS_i, kps \in BO_i, j \in J_i^{ki}, kj \in PO_j, pe \in PE_i, kpe \in (PEO_{i,ps} \cup TPE_{i,pe}), t \in [1, |T| - 1]$$

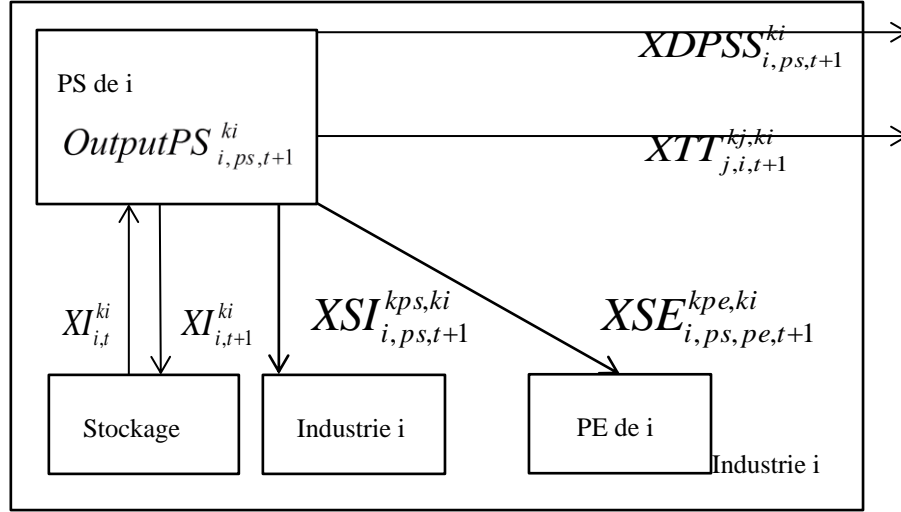


Figure 56. Illustration de la sortie du processus de traitement ps de l'industrie i.

$$\begin{aligned}
& OutputPS_{i,ps,1}^{ki} + inventory_i^{ki} = XDPSS_{i,ps,1}^{ki} + \left( \sum_{j,kj} XTT_{j,i,1}^{kj,ki} \right) + \left( \sum_{kps} XSI_{i,ps,1}^{ki,kps} \right) \\
& + \left( \sum_{pe,kpe} XSE_{i,ps,pe,1}^{kpe,ki} \right) + XI_{i,1}^k
\end{aligned}$$

Équation 81

$$\forall i \in I, ps \in PS_i, ki \in (PSO_{i,ps} \cup TPS_{i,ps}), kps \in BI_i, j \in J_i^{ki}, kj \in PI_j, pe \in PE_i, kpe \in PEI_{i,pe}$$

$$\begin{aligned}
& OutputPS_{i,ps,t+1}^{ki} + XI_{i,t}^{ki} = XDPSS_{i,ps,t+1}^{ki} + \left( \sum_{j,kj} XTT_{j,i,t+1}^{kj,ki} \right) + \left( \sum_{kps} XSI_{i,ps,t+1}^{ki,kps} \right) \\
& + \left( \sum_{pe,kpe} XSE_{i,ps,pe,t+1}^{kpe,ki} \right) + XI_{i,t+1}^k
\end{aligned}$$

Équation 82

$$\forall i \in I, ps \in PS_i, ki \in (PSO_{i,ps} \cup TPS_{i,ps}), kps \in BI_i, j \in J_i^{ki}, kj \in PI_j, pe \in PE_i, kpe \in PEI_{i,pe}, t \in [1, |T| - 1]$$

Tableau 102. Variables de la partie « PS ».

Symbol	Explication	Type	Unité
$XES_{i,pe,ps,t}^{ki,kpe}$	La quantité du type kpe du procédé pe de l'industrie i à remplacer un type de ki du procédé ps durant la période t.	$R^+$	kg
$XSE_{i,ps,pe,t}^{kpe,ki}$	La quantité du type ki du procédé ps de l'industrie i à remplacer un type de kpe du procédé pe durant la période t.	$R^+$	kg
$XDPSE_{i,ps,t}^{ki}$	La quantité du type ki du procédé ps de l'industrie i venant l'extérieur du PEI durant la période t.	$R^+$	Kg
$XDPSS_{i,ps,t}^{ki}$	La quantité du type ki du procédé ps de l'industrie i vers l'extérieur du PEI durant la période t.	$R^+$	kg

Tableau 103. Ensembles de la modélisation de la partie « PS ».

Symbol	Explication
$TPS_{i,ps}$	Le type principale de procédé ps de l'industrie i, $i \in I$ , $ps \in PS_i$ .
$TPE_{i,pe}$	Le type principale de procédé pe de l'industrie i, $i \in I$ , $pe \in PE_i$ .

### 6.2.3.2. Contraintes du contrôle d'un procédé de traitement ps

Pour un procédé de traitement ps de l'industrie i, ses flux d'entrée, qui viennent de lui-même ou d'autres industries intérieures au PEI, les ratios de réaction sont fixés. Et de ses flux de sortie sont également fixés par rapport à ses ratios de réaction à ses flux d'entrée. La quantité totale qui pourrait être envoyée à d'autres industries devrait être délimitée par sa quantité disponible après le processus ps. Les variables et les paramètres sont expliqués dans les Tableaux 104 et 105.

$$InputPS_{i,ps,t}^{ki} \times ratio_{i,ps}^{ki,kprincipaleS} = OutputPS_{i,ps,t}^{kprincipaleS} \quad \text{Équation83}$$

$$\forall i \in I, ps \in PS_i, ki \in PSI_{i,ps}, kprincipaleS \in TPS_{i,ps}, t \in T.$$

$$OutputPS_{i,ps,t}^{ki} \times ratio_{i,ps}^{ki,kprincipaleS} = OutputPS_{i,ps,t}^{kprincipaleS} \quad \text{Équation84}$$

$$\forall i \in I, ps \in PS_i, ki \in PSO_{i,ps}, kprincipaleS \in TPS_{i,ps}, t \in T.$$

$$Z_{i,ps,t} \times ctp_{i,ps}^{kprincipaleS} \geq OutputPS_{i,ps,t}^{kprincipaleS} \quad \text{Équation85}$$

$$\forall i \in I, ps \in PS_i, kprincipaleS \in TPS_{i,ps}, t \in T.$$

Tableau 104. Paramètres de contrôle du procédé ps de l'industrie i.

Symbol	Explication	Unité
$ratio_{i,ps}^{ki,kprincipaleS}$	Le rapport entre le type ki et le type kprincipaleS de l'industrie i durant une période t et kprincipaleS est le principe produit de processus ps de l'industrie i.	/
$ratiosp_{i,ps}^{ki,kprincipaleS}$	Rapport entre le type ki et le type kprincipaleS de l'industrie i durant une période t et kprincipaleS est le principe produit de processus ps de l'industrie i.	/
$ctp_{i,ps}^{kprincipaleS}$	La capacité de la production du type kprincipaleS du procédé ps de l'industrie i.	kg
$cps_{i,ps,t}$	Le coût de la production unitaire d'une unité du produit principale du procédé ps de l'industrie i durant la période t.	€/kg

Tableau 105. Variable de contrôle du procédé ps de l'industrie i.

Symbol	Explication	Type
$Z_{i,ps,t}$	Une industrie i durant une période t utilise un processus de traitement ps ou non, 1 ou 0.	$\{0,1\}$
$InputPS_{i,ps,t}^k$	La quantité d'un flux entrant de type k du processus ps de l'industrie i pendant la période t.	$R^+$
$OutputPS_{i,ps,t}^k$	La quantité d'un flux sortant de type k du processus ps de l'industrie i pendant la période t.	$R^+$

### 6.2.3.3. Contraintes de la performance économique

Pour un procédé  $pe$  de l'industrie i, la performance économique des flux entrants,  $EPSI_i$ , et la performance économique des flux sortants,  $EPSO_i$ , sont présentées dans les équations 86 et 87. Les variables et les paramètres sont expliqués dans les Tableaux 111 et 112.

$$\begin{aligned}
EPSI_i = & -\left(\sum_{ki,t} XI_{i,t}^{ki} \times ui_i^{ki} \times pi_{i,t}^{ki}\right) - \left(\sum_{ki,pe,t} XDPSE_{i,ps,t}^{ki} \times pap_{i,ps,t}^{ki}\right) \\
& - \left(\sum_{kj,j,ki,t} XTT_{i,j,t}^{ki,kj} \times (pu_{j,t}^{kj} + pup_{j,pj,t}^{kj})\right) \\
& + \left(\sum_{ps,kps,ki,t} XIS_{i,ps,t}^{ki,kps} \times (pp_{i,t}^{kps} + \alpha_{i,i}^{ki,kps} \times pap_{i,ps,t}^{ki})\right) \\
& + \left(\sum_{ps,kps,pe,ki,t} XES_{i,pe,ps,t}^{ki,kpe} \times (ppp_{i,pe,t}^{kpe} + \alpha_{i,i}^{ki,kpe} \times pap_{i,ps,t}^{ki})\right) \\
& + \left(\sum_{ps,kprincipal\ eE,pe,ki,t} XES_{i,pe,ps,t}^{ki,kprincipal\ eE} \times (-pup_{i,pe,t}^{kprincipal\ eE} + \alpha_{i,i}^{ki,kprincipal\ eE} \times pap_{i,ps,t}^{ki})\right)
\end{aligned}$$

Équation 86

$\forall i \in I, ki \in PSI_i, pe \in PE_i, kps \in BO_i, j \in J_i^{ki}, kj \in PO_j, pj \in (PE_j \cup PS_j), ps \in PS_i, kpe \in PEO_{i,pe}, kprincipal\ eE \in TPE_{i,pe}, t \in T.$

$$\begin{aligned}
EPSO_i = & -\left(\sum_{t,ki} XI_{i,t}^{ki} \times ui_i^{ki} \times pi_{i,t}^{ki}\right) - \left(\sum_{ps,t,ki} XDPSS_{i,ps,t}^{ki} \times ppp_{i,ps,t}^{ki}\right) \\
& + \left(\sum_{kj,j,t,ki} XTT_{j,i,t}^{kj,ki} \times pup_{i,ps,t}^{ki}\right) \\
& + \left(\sum_{ps,kps,t,ki} XSI_{i,ps,t}^{kps,ki} \times (pup_{i,ps,t}^{ki} + \alpha_{i,i}^{kps,ki} \times pa_{i,t}^{ki})\right) \\
& + \left(\sum_{ps,kpe,pe,t,ki} XSE_{i,ps,pe,t}^{kpe,ki} \times (ppp_{i,ps,t}^{ki} + \alpha_{i,i}^{kpe,ki} \times pap_{i,pe,t}^{kpe})\right) \\
& + \left(\sum_{ps,kprincipal\ eS,pe,ki,kpe,t} XSE_{i,ps,pe,t}^{kpe,kprincipal\ eS} \times (-pup_{i,ps,t}^{kprincipal\ eS} + \alpha_{i,i}^{kpe,kprincipal\ eS} \times pap_{i,pe,t}^{kpe})\right)
\end{aligned}$$

Équation 87

$\forall i \in I, ki \in PSO_i, pe \in PE_i, kps \in BI_i, j \in I_i^{ki}, kj \in PI_j, ps \in PS_i, kpe \in PEI_{i,pe}, kprincipal\ eS \in TPS_{i,ps}, t \in T.$

$$EPS_i = EPSI_i + EPSO_i - \left(\sum_{ps,t,kprincipal\ eS} OutputPS_{i,ps,t}^{kprincipal\ eS} \times cps_{i,t}^{ps}\right)$$

$\forall i \in I, ps \in PS_i, kprincipal\ eS \in TPS_{i,ps}, t \in T.$

Équation 88

#### 6.2.4. Modélisation du coût de transport

Par hypothèse, nous supposons que le camion est vide en retour de transport. Nous proposons que le coût de transport puisse être composé des trois parties:

- Le coût de carburant consommé durant le transport sans charge.
- Le coût de carburant consommé durant le transport avec charge.
- Le coût fixe comprenant le prix du matériel, load-unload, l'exploitation et l'entretien.

L'analyse du coût de transport est détaillée dans le chapitre 4. Les variables et les paramètres sont expliqués dans les Tableaux 106 et 107.

$$\forall i \in I, j \in J, kj \in PI_j, ki \in PO_i, N_{ji,t} \times cm < \sum_{ki,kj} XTT_{j,i,t}^{kj,ki} \leq (N_{ji,t} + 1) \times cm \quad \text{Équation 89}$$

$$\begin{aligned} \forall i \in I, j \in J, kj \in PI_j, ki \in PI_i, t \in T, XTI_{ji,i,t} + XTJ_{ji,j,t} = \\ 2(N_{ji,t} + 1) \times (coef\_a \times d_{ji} + coef\_b) + (N_{ji,t} + 1) \times \frac{d_{ji}}{v} \times cphsc \times prixC \\ + N_{ji,t} \times \frac{d_{ji}}{v} \times \frac{cm}{pc} \times cphsc \times prixC \\ + \frac{d_{ji}}{v} \times \frac{(\sum_{ki,kj} XTT_{j,i,t}^{kj,ki}) - N_{ji,t} \times cm}{pc} \times cphsc \times prixC \end{aligned} \quad \text{Équation 90}$$

Tableau 106. Variables de la modélisation du coût de transport.

Symbol	Explication	Unité	Type
$N_{ji,t}$	$(N_{ji,t} + 1)$ est le nombre minimum d'aller-retour de l'industrie i à l'industrie j durant la période t.	/	$Z^+ \cup \{0\}$
$XTI_{ji,i,t}$	Le frais chargé par i pour les transports de i à j durant la période t.	€	$R^+$
$XTJ_{ji,j,t}$	Le frais chargé par j pour les transports de i à j durant la période t.	€	$R^+$

Tableau 107. Paramètres de la modélisation du coût de transport.

Symbol	Explication	Unité
$coef\_a$	Le coefficient du coût fixe de transport en camion.	/
$coef\_b$	Le coefficient du coût fixe de transport en camion.	/
$pc$	Le poids du camion équipé.	t
$cphsc$	Le carburant consommé du camion par heure sans charge.	gal/h
$prixC$	Le prix de carburant.	€/gal
$d_{ij}$	La distance routière entre les deux industries i et j.	km
$v$	La vitesse du camion.	km/h
$cm$	La capacité du camion.	t

### 6.2.5. Modélisation de la partie « Stockage »

Pour une industrie i, à chaque instant, la quantité totale de son stockage devrait être contrôlée par sa capacité du stockage. Nous supposons que l'expression du coût total du stockage durant une période est linéaire. Les variables et les paramètres sont expliqués dans les Tableaux 108 et 109.

Tableau 108. Variable du stockage de l'industrie i

Symbol	Explication	Type	Unité
$XI_{i,t}^{ki}$	La quantité du flux sortant du type ki de l'industrie i qui sera envoyé à son stockage au cours d'une période t.	$R^+$	kg

Tableau 109. Paramètres du stockage de l'industrie i.

Symbol	Explication	Unité
$ui_i^{ki}$	Le volume unitaire du type ki de l'industrie i.	$m^3$
$pi_i^{ki}$	Le prix unitaire du stockage d'une unité du type ki de l'industrie i.	$\text{€}/m^3$
$ci_{i,t}$	La capacité du stockage de l'industrie i durant la période t.	$m^3$

$$\forall i \in I, ki \in K. ci_{i,1} - \sum_{ki} (inventory_i^{ki} \times u_i^{ki}) \geq \sum_{ki} (XI_{i,1}^{ki}) \quad \text{Équation91}$$

$$\forall i \in I, ki \in K, t \in [1, |T| - 1], ci_{i,t+1} \geq \sum_{ki} (XI_{i,t+1}^{ki}) \quad \text{Équation92}$$

### 6.2.6. Modélisation de la performance économique d'une industrie

Pour une industrie i, sa performance économique est la somme des coûts des traitements directs, des coûts du stockage et des bénéfices économiques en vendant des flux des échanges aux autres industries intérieur au PEI.

*EBO* et *EBI* représentent les performances économiques de la partie « Industrie i ». *EPEI*, *EPEO* et *EPEOprincipale* représentent les performances économiques de la partie « PE ». *EPSI*, *EPSO* et *EPSOprincipale* représentent les performances économiques de la partie « PS ». Les variables et les paramètres sont expliqués dans les Tableaux 111 et 112.

$$E_i = EBO_i + EBI_i + EPEI_i + EPEO_i + EPEOprincipale_i + EPSI_i + EPSO_i + EPSOprincipale_i - \left( \sum_j XTI_{ji,i} \right) - \left( \sum_j XTJ_{ij,i} \right) \quad \text{Équation93}$$

$$\forall i \in I, j \in I.$$

$$\begin{aligned}
EBO_i = & -\left(\sum_{k,t} XDS_{i,t}^k \times pp_{i,t}^k\right) - \left(\sum_{k,t} XI_{i,t}^k \times pi_{i,t}^k\right) \\
& + \left(\sum_{k,j,kj,t} XTT_{j,i}^{kj,k} \times pu_{i,t}^k\right) + \left(\sum_{k,kpe,pe,t} XIE_{i,pe,t}^{kpe,k} \times (pp_{i,t}^k + \alpha_{i,i}^{kpe,k} pap_{i,pe,t}^{kpe})\right) \\
& + \left(\sum_{k,kps,ps,t} XIS_{i,ps,t}^{kps,k} \times (pp_{i,t}^k + \alpha_{i,i}^{kps,k} pap_{i,ps,t}^{kps})\right)
\end{aligned} \tag{Equation 94}$$

$\forall i \in I, t \in T, k \in BO_i, j \in I_i^k, kj \in PI_j, pe \in PE_i, kpe \in PEI_{i,pe}, ps \in PS_i, kps \in PSI_{i,ps}.$

$$\begin{aligned}
EBI_i = & -\left(\sum_{k,t} XDE_{i,t}^k \times pa_{i,t}^k\right) - \left(\sum_{k,t} XI_{i,t}^k \times pi_{i,t}^k\right) \\
& - \left(\sum_{k,j,kj,pj,t} XTT_{i,j}^{k,kj} \times (pu_{j,t}^{kj} + pup_{j,pj,t}^{kj})\right) \\
& + \left(\sum_{k,kpe,pe,t} XEI_{i,pe,t}^{k,kpe} \times (ppp_{i,pe,t}^{kpe} + \alpha_{i,i}^{k,kpe} pa_{i,t}^k)\right) \\
& + \left(\sum_{k,kpeE,pe,t} XEI_{i,pe,t}^{k,kpeE} \times (-pup_{i,pe,t}^{kpeE} + \alpha_{i,i}^{k,kpeE} pa_{i,t}^k)\right) \\
& + \left(\sum_{k,kps,ps,t} XSI_{i,ps,t}^{k,kps} \times (ppp_{i,ps,t}^{kps} + \alpha_{i,i}^{k,kps} pa_{i,t}^k)\right) \\
& + \left(\sum_{k,kpsS,ps,t} XSI_{i,ps,t}^{k,kpsS} \times (-pup_{i,ps,t}^{kpsS} + \alpha_{i,i}^{k,kpsS} pa_{i,t}^k)\right)
\end{aligned} \tag{Equation 95}$$

$\forall i \in I, t \in T, k \in BI_{i,k}, j \in J_i^k, pj \in (PE_j \cup PS_j), kj \in PO_j, pe \in PE_i, kpe \in PEO_{i,pe}, ps \in PS_i, kps \in PSO_{i,ps}, kpeE \in TPE_{i,pe}, kpsS \in TPS_{i,ps}.$

$$\begin{aligned}
EPEI_i = & -\left(\sum_{k,pe,t} XDPEE_{i,pe,t}^k \times pap_{i,pe,t}^k\right) - \left(\sum_{k,t} XI_{i,t}^k \times pi_{i,t}^k\right) \\
& - \left(\sum_{k,j,kj,pj,t} XTT_{i,j}^{k,kj} \times (pu_{j,t}^{kj} + pup_{j,pj,t}^{kj})\right) \\
& + \left(\sum_{k,kpe,pe,t} XIE_{i,pe,t}^{k,kpe} \times (pp_{i,t}^{kpe} + \alpha_{i,i}^{k,kpe} pap_{i,pe,t}^k)\right) \\
& + \left(\sum_{k,kps,pe,ps,t} XSE_{i,ps,pe,t}^{k,kps} \times (ppp_{i,ps,t}^{kps} + \alpha_{i,i}^{k,kps} pap_{i,ps,t}^k)\right) \\
& + \left(\sum_{k,kpsS,pe,ps,t} XSE_{i,ps,pe,t}^{k,kpsS} \times (-pup_{i,ps,t}^{kpsS} + \alpha_{i,i}^{k,kpsS} pap_{i,ps,t}^k)\right)
\end{aligned} \tag{Equation 96}$$

$\forall i \in I, t \in T, pe \in PE_i, k \in PEI_{i,pe}, j \in J_i^k, pj \in (PE_j \cup PS_j), kj \in PO_j, kpe \in BO_i, ps \in PS_i, kps \in PSO_{i,ps}, kpsS \in TPS_{i,ps}.$

$$\begin{aligned}
EPEO_i &= -\left(\sum_{k,pe,t} XDPES_{i,pe,t}^k \times PPP_{i,pe,t}^k\right) - \left(\sum_{k,t} XI_{i,t}^k \times pi_{i,t}^k\right) \\
&+ \left(\sum_{k,j,kj,pe,t} XTT_{j,i}^{kj,k} \times pup_{i,pe,t}^k\right) \\
&+ \left(\sum_{k,kpe,pe,t} XEI_{i,pe,t}^{kpe,k} \times (PPP_{i,pe,t}^k + \alpha_{i,i}^{kpe,k} pa_{i,t}^{kpe})\right) \\
&+ \left(\sum_{k,kps,pe,ps,t} XES_{i,pe,ps,t}^{kps,k} \times (PPP_{i,pe,t}^k + \alpha_{i,i}^{kps,k} pap_{i,ps,t}^{kps})\right)
\end{aligned} \tag{Équation 97}$$

$\forall i \in I, t \in T, pe \in PE_i, k \in PEO_{i,pe}, j \in I_i^k, kj \in PI_j, kpe \in BI_i, ps \in PS_i, kps \in PSI_{i,ps}$ .

$$\begin{aligned}
EPEO_{principale}_i &= \left(\sum_{k,pe,t} XDPES_{i,pe,t}^k \times pap_{i,pe,t}^k\right) - \left(\sum_{k,t} XI_{i,t}^k \times pi_{i,t}^k\right) \\
&+ \left(\sum_{k,j,kj,pe,t} XTT_{j,i}^{kj,k} \times pup_{i,pe,t}^k\right) \\
&+ \left(\sum_{k,kpe,pe,t} XEI_{i,pe,t}^{kpe,k} \times (-pup_{i,pe,t}^k + \alpha_{i,i}^{kpe,k} pa_{i,t}^{kpe})\right) \\
&+ \left(\sum_{k,kps,pe,ps,t} XES_{i,pe,ps,t}^{kps,k} \times (-pup_{i,pe,t}^k + \alpha_{i,i}^{kps,k} pap_{i,ps,t}^{kps})\right)
\end{aligned} \tag{Équation 98}$$

$\forall i \in I, t \in T, pe \in PE_i, k \in TPE_{i,pe}, j \in I_i^k, kj \in PI_j, kpe \in BI_i, ps \in PS_i, kps \in PSI_{i,ps}$ .

$$\begin{aligned}
EPSI_i &= -\left(\sum_{k,ps,t} XDPSE_{i,ps,t}^k \times pap_{i,ps,t}^k\right) - \left(\sum_{k,t} XI_{i,t}^k \times pi_{i,t}^k\right) \\
&- \left(\sum_{k,j,kj,pj,t} XTT_{i,j}^{k,kj} \times (pu_{j,t}^{kj} + pup_{j,pj,t}^{kj})\right) \\
&+ \left(\sum_{k,kps,ps,t} XIS_{i,ps,t}^{k,kps} \times (pp_{i,t}^{kps} + \alpha_{i,i}^{k,kps} pap_{i,ps,t}^k)\right) \\
&+ \left(\sum_{k,kpe,pe,ps,t} XES_{i,pe,ps,t}^{k,kpe} \times (PPP_{i,pe,t}^{kpe} + \alpha_{i,i}^{k,kpe} pap_{i,ps,t}^k)\right) \\
&+ \left(\sum_{k,kpeE,pe,ps,t} XES_{i,pe,ps,t}^{k,kpeE} \times (-pup_{i,pe,t}^{kpeE} + \alpha_{i,i}^{k,kpeE} pap_{i,ps,t}^k)\right)
\end{aligned} \tag{Équation 99}$$

$\forall i \in I, t \in T, pe \in PS_i, k \in PSI_{i,ps}, j \in J_i^k, pj \in (PE_j \cup PS_j), kj \in PO_j, kpe \in BO_i, pe \in PE_i, kps \in PEO_{i,ps}, kpeE \in TPE_{i,pe}$ .



$$\begin{aligned}
EPSO_i = & -\left(\sum_{k,ps,t} XDPES_{i,ps,t}^k \times PPP_{i,ps,t}^k\right) - \left(\sum_{k,t} XI_{i,t}^k \times pi_{i,t}^k\right) \\
& + \left(\sum_{k,j,kj,ps,t} XTT_{j,i}^{kj,k} \times pup_{i,ps,t}^k\right) \\
& + \left(\sum_{k,kps,ps,t} XSI_{i,ps,t}^{kps,k} \times (PPP_{i,ps,t}^k + \alpha_{i,i}^{kps,k} pa_{i,t}^{kps})\right) \\
& + \left(\sum_{k,kpe,pe,ps,t} XSE_{i,ps,pe,t}^{kpe,k} \times (PPP_{i,ps,t}^k + \alpha_{i,i}^{kpe,k} pap_{i,pe,t}^{kpe})\right)
\end{aligned} \tag{Équation 100}$$

$\forall i \in I, t \in T, ps \in PS_i, k \in PSO_{i,ps}, j \in I_i^k, kj \in PI_j, kpe \in BI_i, pe \in PE_i, kpe \in PEI_{i,pe}$ .

$$\begin{aligned}
EPSO_{principale}_i = & \left(\sum_{k,ps,t} XDPES_{i,ps,t}^k \times pup_{i,ps,t}^k\right) - \left(\sum_{k,t} XI_{i,t}^k \times pi_{i,t}^k\right) \\
& + \left(\sum_{k,j,kj,ps,t} XTT_{j,i}^{kj,k} \times pup_{i,ps,t}^k\right) \\
& + \left(\sum_{k,kps,ps,t} XSI_{i,ps,t}^{kps,k} \times (-pup_{i,ps,t}^k + \alpha_{i,i}^{kps,k} pa_{i,t}^{kps})\right) \\
& + \left(\sum_{k,kpe,pe,ps,t} XSE_{i,ps,pe,t}^{kpe,k} \times (-pup_{i,ps,t}^k + \alpha_{i,i}^{kpe,k} pap_{i,pe,t}^{kpe})\right)
\end{aligned} \tag{Équation 101}$$

$\forall i \in I, t \in T, ps \in PS_i, k \in TPS_{i,ps}, j \in I_i^k, kj \in PI_j, kpe \in BI_i, pe \in PE_i, kpe \in PEI_{i,ps}$ .

Afin de réaliser des bénéfices économiques par la participation d'un PEI, pour une industrie  $i$ , son coût total sans la participation du PEI devrait être supérieur à celle avec la participation du PEI. Ou il y aura des investissements provenant d'autres sources ( $f_i$ ), comme le gouvernement, donc un paramètre pourrait être ajouté pour contrôler ce problème économique.

$$\forall i \in I, f_i + E_i \geq EBOref_i + EBIf_i + seuil_i \tag{Équation 102}$$

### 6.3. Fonction objective et résumé du modèle

La conception de modèle III est basée sur celle de modèle II. Une industrie peut être considérée en tant que une industrie de type <<fournisseur>> et de type <<client>>. La partie de processus de traitement est intégrée dans la modélisation. Les options de remplacement de matériel, de processus de traitement et de partage de coût de transport étaient ajoutées dans la modélisation. La possibilité d'auto-recyclage était intégrée dans le modèle III. Le modèle III est dynamique au niveau de temps et les paramètres sont flexibles durant les différentes périodes de temps.

L'objectif de ce modèle est destiné à maximiser la quantité totale des échanges à l'intérieur PEI. Ce modèle est un modèle de programmation linéaire mixte en nombres entiers.

$$\forall i \in I, j \in I, ki \in K, kj \in K, t \in T, \text{Max}(\sum_t \sum_{i,j,ki,kj} XTT_{i,j,t}^{ki,kj}) \quad \text{Équation 103}$$

Tableau 110. Résumé des ensembles du modèle.

Symbol	Explication
$I$	Les industries à l'intérieur du PEI.
$T$	Les périodes considérées.
$K$	Les types des sous-produits à l'intérieur du PEI.
$P$	Les procédés des traitements à l'intérieur du PEI.
$PE_i$	Les procédés des traitements des flux entrants de l'industrie $i$ , $i \in I$ .
$PS_i$	Les procédés des traitements des flux sortants de l'industrie $i$ , $i \in I$ .
$PEI_{i,pe}$	Les types entrants du procédé $pe$ de l'industrie $i$ , $i \in I$ , $pe \in PE_i$ .
$PSI_{i,ps}$	Les types entrants du procédé $ps$ de l'industrie $i$ , $i \in I$ , $ps \in PS_i$ .
$PEO_{i,pe}$	Les types sortants du procédé $pe$ de l'industrie $i$ , $i \in I$ , $pe \in PE_i$ , sauf le type principale.
$PSO_{i,ps}$	Les types sortants du procédé $ps$ de l'industrie $i$ , $i \in I$ , $ps \in PS_i$ , sauf le type principale.
$J_i^{ki}$	Les industries fournisseurs potentiels du type $ki$ de l'industrie $i$ , $i \in I$ , $ki \in BO_i$ .
$I_i^{ki}$	Les industries clients potentiels à acheter du type $ki$ de l'industrie $i$ , $i \in I$ , $ki \in BO_i$ .
$PO_j$	Les types sortants de l'industrie $j$ , $j \in J_i^{ki}$ .
$PI_j$	Les types entrant de l'industrie $j$ , $j \in I_i^{ki}$ .
$TPS_{i,ps}$	Le type principale du procédé $ps$ de l'industrie $i$ , $i \in I$ , $ps \in PS_i$ .
$TPE_{i,pe}$	Le type principale du procédé $pe$ de l'industrie $i$ , $i \in I$ , $pe \in PE_i$ .
$BO_i$	Les types sortants de l'industrie $i$ sans participation du PEI.
$BI_i$	Les types entrants de l'industrie $i$ sans participation du PEI.

Tableau 111. Résumé des variables du modèle.

Symbol	Explication	Type
$XDS_{i,t}^{ki}$	La quantité du flux sortant du type $ki$ de l'industrie $i$ qui sera traité directement pendant une période $t$ .	$R^+$
$XI_{i,t}^{ki}$	La quantité du flux sortant du type $ki$ de l'industrie $i$ qui sera envoyé à son stockage au cours d'une période $t$ .	$R^+$
$XIE_{i,pe,t}^{kpe,ki}$	La quantité du flux d'échange du type $ki$ de l'industrie $i$ à un des procédés des traitements $pe$ pour remplacer le type $kpe$ au cours d'une période $t$ . Les types $ki$ et $kpe$ peuvent être identiques.	$R^+$
$XIS_{i,ps,t}^{kps,ki}$	La quantité du flux d'échange du type $ki$ de l'industrie $i$ à un des procédés des traitements $ps$ pour remplacer le type $kps$ au cours d'une période $t$ . Les types $ki$ et $kps$ peuvent être identiques.	$R^+$
$XTT_{j,i,t}^{kj,ki}$	La quantité du flux d'échange du type $ki$ de l'industrie $i$ à une autre industrie $j$ pour remplacer le type $kj$ au cours de la période $t$ .	$R^+$
$XDE_{i,t}^{ki}$	La quantité du flux entrant du type $ki$ de l'industrie $i$ venant l'extérieur du PEI pendant une période $t$ .	$R^+$
$XEI_{i,pe,t}^{ki,kpe}$	La quantité du flux d'auto-recyclage du type $kpe$ d'un des procédés des traitements $pe$ pour remplacer le type $ki$ dans l'industrie $i$ au cours d'une période $t$ . Les types $ki$ et $kpe$ peuvent être identiques.	$R^+$
$XSI_{i,ps,t}^{ki,kps}$	La quantité du flux d'auto-recyclage du type $kps$ d'un des procédés des traitements $ps$ pour remplacer $ki$ dans l'industrie $i$ au cours d'une période $t$ . Les types $ki$ et $kps$ peuvent être identiques.	$R^+$
$XES_{i,pe,ps,t}^{kps,ki}$	La quantité du type $kps$ du procédé $ps$ de l'industrie $i$ à remplacer le type $ki$ du procédé $pe$ durant la période $t$ .	$R^+$
$XSE_{i,ps,pe,t}^{ki,kps}$	La quantité du type $ki$ du procédé $pe$ de l'industrie $i$ à remplacer le type $kps$ du procédé $ps$ durant la période $t$ .	$R^+$
$XDPEE_{i,pe,t}^{ki}$	La quantité du type $ki$ du procédé $pe$ de l'industrie $i$ venant l'extérieur du PEI durant la période $t$ .	$R^+$
$XDPESE_{i,pe,t}^{ki}$	La quantité du type $ki$ du procédé $pe$ de l'industrie $i$ vers l'extérieur du PEI durant la période $t$ .	$R^+$
$Z_{i,p,t}$	Une industrie $i$ durant une période $t$ utilise un processus de traitement $p$ ou non, 1 ou 0.	$\{0,1\}$
$XDPSE_{i,ps,t}^{ki}$	La quantité du type $ki$ du procédé $ps$ de l'industrie $i$ venant l'extérieur du PEI durant la période $t$ .	$R^+$
$XDPSS_{i,ps,t}^{ki}$	La quantité du type $ki$ du procédé $ps$ de l'industrie $i$ vers l'extérieur du PEI durant la période $t$ .	$R^+$
$N_{ji,t}$	$(N_{ji,t} + 1)$ est le nombre de fois minimum d'aller-retour de l'industrie $i$ à $j$ durant la période $t$ .	$Z^+$
$XTI_{ji,i,t}$	Le frais chargé par $i$ pour les transports de $i$ à $j$ durant la période $t$ .	$R^+$
$XTJ_{ji,j,t}$	Le frais chargé par $j$ pour les transports de $i$ à $j$ durant la période $t$ .	$R^+$

$E_i$	La performance économique de l'industrie $i$ du PEI.	$R$
$X$	La quantité totale des flux échanges du PEI à maximiser.	$R^+$

Tableau 112. Résumé des paramètres du modèle.

Symbol	Explication
$production_{i,t}^{ki}$	La quantité du sous-produit du type $ki$ de l'industrie $i$ pendant une période $t$ .
$inventory_{i,1}^{ki}$	La quantité du stockage initial du type $ki$ de l'industrie $i$ .
$demande_{i,t}^{ki}$	La quantité entrante de la demande du type $ki$ pour la production de l'industrie $i$ durant une période $t$ .
$pu_{i,t}^{ki}$	Le prix unitaire de vente du type $ki$ de l'industrie $i$ .
$pa_{i,t}^{ki}$	Le prix unitaire d'achat du type $ki$ de l'industrie $i$ .
$pup_{i,p,t}^{ki}$	Le prix unitaire de vente du type $ki$ de l'industrie $i$ après le procédé de traitement $p$ .
$pap_{i,p,t}^{ki}$	Le prix unitaire d'achat du type $ki$ de l'industrie $i$ pour le procédé de traitement $p$ .
$\alpha_{j,i}^{kj,ki}$	Le taux de conversion du flux d'échange du type $ki$ de l'industrie $i$ à l'industrie $j$ pour remplacer du type $kj$ , si le type $ki$ pourrait être utilisé par l'industrie $j$ à remplacer le type $kj$ , puis une unité de $kj$ pourrait être remplacé par $\alpha_{j,i}^{kj,ki}$ unité de $ki$ .
$ui_i^{ki}$	Le volume d'une unité du type $ki$ de l'industrie $i$ .
$pi_i^{ki}$	Le prix unitaire du stockage d'une unité du type $ki$ de l'industrie $i$ .
$ci_{i,t}$	La capacité du stockage de l'industrie $i$ durant la période $t$ .
$ratio_{i,pe}^{ki,kprincipaleE}$	Le rapport entre le type $ki$ et le type $kprincipaleE$ de l'industrie $i$ durant une période $t$ et $kprincipaleE$ est le principe produit de processus $pe$ de l'industrie $i$ .
$ratiosp_{i,pe}^{ki,kprincipaleE}$	Le rapport entre le type $ki$ et le type $kprincipaleE$ de l'industrie $i$ durant une période $t$ et $kprincipaleE$ est le principe produit de processus $pe$ de l'industrie $i$ .
$ctp_{i,pe}^{kprincipaleE}$	La capacité de production du type $kprincipaleE$ du procédé $pe$ de l'industrie $i$ .
$cpe_{i,pe,t}$	Le coût de production unitaire d'une unité de produit principale du procédé $pe$ de l'industrie $i$ durant la période $t$ .
$coef\_a$	Le coefficient du coût fixe de transport en camion.

$coef\_b$	Le coefficient du coût fixe de transport en camion.
$pc$	Le poids du camion équipé.
$cphsc$	Le carburant consommé du camion par heure sans charge.
$prixC$	Le prix de carburant.
$d_{ij}$	La distance routière entre les deux industries $i$ et $j$ .
$v$	La vitesse du camion.
$cm$	La capacité du camion.
$f_i$	Le support financier pour une industrie $i$ venant l'extérieur du PEI.
$seuil_i$	Le seuil de la performance économique de l'industrie $i$ .

#### 6.4. Exemple numérique

Le système de la modélisation algébrique général (GAMS, en anglais : General Algebraic Modeling System) est un système de la modélisation de haut niveau pour la programmation mathématique et l'optimisation, initié par la Banque Mondiale (voir [160]). Les simulations numériques ont été réalisées sur un PC DELL muni d'un processeur de type : Intel(R) Core(TM) 2 Duo CPU, P7450, 2,13GHz. CPLEX utilise un algorithme de Branch-and-Cut qui résout une série de sous-problèmes de programmation linéaire.

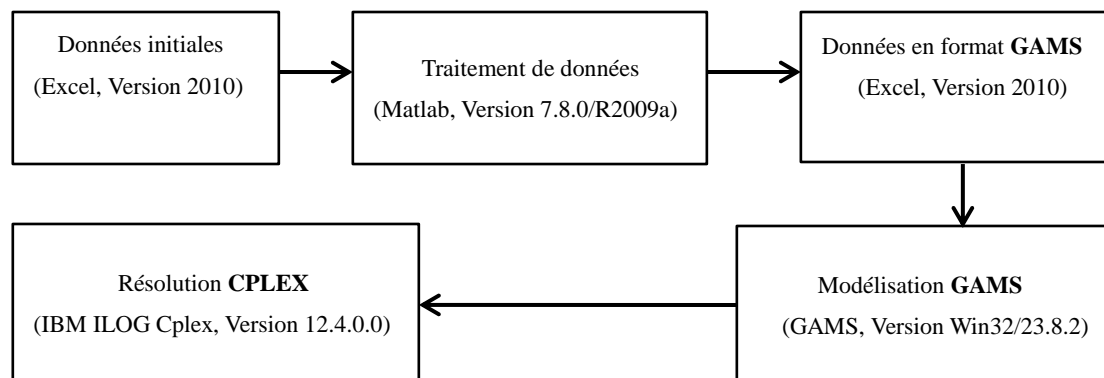


Figure 57. Etapes de simulations numériques

##### 6.4.1. Données initiales

Dans ce PEI, nous supposons qu'aucun stockage initial n'existe et nous avons au total quatre périodes de temps à considérer. Les tableaux suivants (Tableau 113 à Tableau 135) sont les tableaux désignés pour les données initiales et ils sont remplis par les données aléatoires afin de montrer les fonctionnements de ce modèle.

Tableau 113. Fiche de données « Location ».

Indice de l'industrie	Capacité du stockage	Location x	Location y
1	1000	8	12
2	1000	12	6
3	1000	4	6
4	1000	16	18
5	1000	4	18

Tableau 114. Fiche de données « BO ».

Industrie	Indice de type de sortie (BO)	Stockage initial	Volume unitaire du stockage
1	1	0	1
1	2	0	1
2	7	0	1
3	6	0	1
3	7	0	1
4	9	0	1
5	2	0	1
6	6	0	1
2	13	0	1
6	13	0	1

Tableau 115. Fiche de données « BI ».

Industrie	Indice de type d'entrée (BI)	Stockage initial	Volume unitaire du stockage
1	13	0	1
2	11	0	1
3	13	0	1
4	12	0	1
5	13	0	1
6	1	0	1

Tableau 116. Fiche de données « PE ».

Industrie	Type de procédé (PE)	Type principale de PE	Stockage initial	Volume unitaire du stockage
2	4	11	0	1
4	5	12	0	1

Tableau 117. Fiche de données « PS ».

Industrie	Type de procédé (PS)	Type principale de PS	Stockage initial	Volume unitaire du stockage
1	1	3	0	1
1	2	5	0	1
3	3	8	0	1

Tableau 118. Fiche de données « PEI ».

Industrie	Type de procédé (PE)	Type entrant de procédé PE	Type principale de PE	Ratio	Stockage initial	Volume unitaire du stockage
2	4	6	11	0,9	0	1
2	4	10	11	0,8	0	1
4	5	9	12	0,9	0	1
4	5	10	12	0,8	0	1
4	5	6	12	0,9	0	1

Tableau 119. Fiche de données « PEO ».

Industrie	Type de procédé (PE)	Type sortant de procédé PE	Type principale de PE	Ratiosp	Stockage initial	Volume unitaire du stockage
2	4	12	11	4	0	1
4	5	13	12	2	0	1

Tableau 120. Fiche de données « PSI ».

Industrie	Type de procédé (PS)	Type entrant de procédé PS	Type principale de PS	Ratio	Stockage initial	Volume unitaire du stockage
1	1	1	3	0,9	0	1
1	1	2	3	0,9	0	1
1	2	1	5	0,8	0	1
1	2	2	5	0,8	0	1
3	3	6	8	0,8	0	1
3	3	7	8	0,9	0	1

Tableau 121. Fiche de données « PSO ».

Industrie	Type de procédé (PS)	Type sortant de procédé Ps	Type principale de PS	Ratiosp	Stockage initial	Volume unitaire du stockage
1	1	4	3	4	0	1
1	2	6	5	2	0	1
3	3	9	8	6	0	1
3	3	10	8	4	0	1

Tableau 122. Fiche de données « Type Remplace ».

KI	KJ (kj peut être remplacé par ki.)	Taux
4	9	2

Tableau 123. Fiche de données « Quantité de Production».

Industrie	Type de matériel	Période1	Période 2	Période 3	Période 4
1	1	200	200	200	200
1	2	100	100	100	100
2	7	50	100	50	100
2	13	100	100	50	50
3	6	20	20	20	20
3	7	100	100	100	100
4	9	100	120	100	120
5	2	100	100	100	100
6	6	50	50	50	50
6	13	200	150	200	150

Tableau 124. Fiche de données « Quantité de Demande».

Industrie	Type de matériel	Période1	Période 2	Période 3	Période 4
1	13	150	150	150	150
2	11	100	100	100	100
3	13	50	50	50	50
4	12	100	150	100	150
5	13	120	100	120	100
6	1	50	50	50	50

Tableau 125. Fiche de données « Capacité de traitement d'un procédé».

Industrie	Procédé	Type principale de procédé	Période 1	Période 2	Période 3	Période 4
1	1	3	400	400	400	400
1	2	5	400	400	400	400
2	4	11	300	300	300	300
3	3	8	200	200	200	200
4	5	12	400	400	400	400

Tableau 126. Fiche de données « Capacité du stockage».

Industrie	Période1	Période 2	Période 3	Période 4
1	1000	1000	1000	1000
2	1000	1000	1000	1000
3	1000	1000	1000	1000
4	1000	1000	1000	1000
5	1000	1000	1000	1000
6	1000	1000	1000	1000



Tableau 127. Fiche de données « PU».

Industrie	Type sortant de l'industrie(BO)	Période1	Période 2	Période 3	Période 4
1	1	10	10	10	10
1	2	10	15	10	15
2	7	5	5	5	5
3	6	5	5	5	5
3	7	5	5	5	5
4	9	5	5	5	5
5	2	5	8	5	8
6	6	8	8	8	8
2	13	20	20	20	20
6	13	18	22	18	22

Tableau 128. Fiche de données « PUP».

Industrie	Procédé	Type sortant	Période1	Période 2	Période 3	Période 4
2	4	11	30	30	30	30
4	5	12	30	30	30	30
1	1	3	60	60	60	60
1	2	5	55	55	55	55
3	3	8	40	40	40	40
2	4	12	25	28	28	25
4	5	13	20	15	20	15
1	1	4	5	5	5	5
1	2	6	5	5	5	5
3	3	9	5	5	5	5
3	3	10	5	5	5	5

Tableau 129. Fiche de données « PP».

Industrie	Type de matériel	Période1	Période 2	Période 3	Période 4
1	1	100	100	100	100
1	2	80	80	80	80
2	7	20	20	20	20
3	6	30	30	30	30
3	7	22	22	22	22
4	9	50	50	50	50
5	2	80	80	80	80
6	6	30	30	30	30
2	13	40	40	40	40
6	13	40	40	40	40

Tableau 130. Fiche de données « PPP».

Industrie	Procédé	Type sortant	Période1	Période 2	Période 3	Période 4
2	4	12	50	50	50	50
4	5	13	30	30	30	30
1	1	4	5	5	5	5
1	2	6	10	10	10	10
3	3	9	10	10	10	10
3	3	10	5	5	5	5

Tableau 131. Fiche de données « PA».

Industrie	Type entrant	Période1	Période 2	Période 3	Période 4
1	13	50	50	50	50
2	11	50	50	50	50
3	13	55	55	55	55
4	12	55	55	55	55
5	13	50	50	50	50
6	1	5	5	5	5

Tableau 132. Fiche de données « PAP».

Industrie	Procédé	Type de matériel	Période1	Période 2	Période 3	Période 4
2	4	6	10	10	10	10
2	4	10	5	5	5	5
4	5	9	15	15	15	15
4	5	10	5	5	5	5
4	5	6	10	10	10	10
1	1	1	10	10	10	10
1	1	2	10	10	10	10
1	2	1	10	10	10	10
1	2	2	15	15	15	15
3	3	6	10	10	10	10
3	3	7	8	8	8	8

Tableau 133. Fiche de données « Coût unitaire de production CPE et CPS».

Industrie	Procédé	Type principale	Période1	Période 2	Période 3	Période 4
2	4	11	1	1	1	1
4	5	12	1	1	1	1
1	1	3	1	1	1	1
1	2	5	1	1	1	1
3	3	8	1	1	1	1

Tableau 134. Fiche de données « PI ».

Industrie	Type de matériel	Période1	Période 2	Période 3	Période 4
1	1	0,5	0,5	0,5	0,5
1	2	0,5	0,5	0,5	0,5
1	3	0,5	0,5	0,5	0,5
1	4	0,5	0,5	0,5	0,5
1	5	0,5	0,5	0,5	0,5
1	6	0,5	0,5	0,5	0,5
1	13	0,5	0,5	0,5	0,5
2	6	0,5	0,5	0,5	0,5
2	7	0,5	0,5	0,5	0,5
2	10	0,5	0,5	0,5	0,5
2	11	0,5	0,5	0,5	0,5
2	12	0,5	0,5	0,5	0,5
2	13	0,5	0,5	0,5	0,5
3	6	0,5	0,5	0,5	0,5
3	7	0,5	0,5	0,5	0,5
3	8	0,5	0,5	0,5	0,5
3	9	0,5	0,5	0,5	0,5
3	10	0,5	0,5	0,5	0,5
3	13	0,5	0,5	0,5	0,5
4	6	0,5	0,5	0,5	0,5
4	9	0,5	0,5	0,5	0,5
4	10	0,5	0,5	0,5	0,5
4	12	0,5	0,5	0,5	0,5
4	13	0,5	0,5	0,5	0,5
5	2	0,5	0,5	0,5	0,5
5	13	0,5	0,5	0,5	0,5
6	1	0,5	0,5	0,5	0,5
6	6	0,5	0,5	0,5	0,5
6	13	0,5	0,5	0,5	0,5

Tableau 135. Fiche de données « Seuil ».

Industrie	Période1	Période 2	Période 3	Période 4
1	-1000000	-1000000	-1000000	-1000000
2	-1000000	-1000000	-1000000	-1000000
3	-1000000	-1000000	-1000000	-1000000
4	-1000000	-1000000	-1000000	-1000000
5	-1000000	-1000000	-1000000	-1000000
6	-1000000	-1000000	-1000000	-1000000

### 6.4.2. La résolution

D'après la collection des données initiales illustrées dans les tableaux dans la section 6.4.1, le traitement des données initiales est réalisé sous l'environnement du Matlab Version 7.8.0 R2009a, ensuite les données traitées en format compatible avec l'environnement du GAMS Version Win32 23.8.2 étaient préparées. Lorsque les données traitées communiquent avec le GAMS à travers la modélisation programmée, le solveur IBM ILOG CPLEX Version 12.4.0.0 est utilisé pour trouver la meilleure solution correspondant notre modèle et les données initiales.

Les simulations ont été réalisées sur un PC DELL muni d'un processeur de type : Intel(R) Core(TM) 2 Duo CPU, P7450, 2,13GHz.

Tableau 136. Temps de calcul.

Logiciel	Temps utilisé (seconde)
Matlab	379,268
GAMS	33,013
CPLEX	4,488
<b>Total</b>	<b>416,769</b>

Tableau 137. Statistique de modèle

Nombre de variables	946
Nombre de variable intégrér	140
Nombre d'équations	710
Nombre d'itérations	312
Objective	5413,333

Les valeurs des variables indiquées dans le Tableau 111 peuvent être déterminées après la résolution numérique de cet exemple de modèle. Parmi ces variables, les quantités des flux d'échange entre les industries intérieures au PEI sont représentées par les variables de type  $XTT_{j,i,t}^{kj,ki}$ .

$XTT_{j,i,t}^{kj,ki}$  signifie la quantité d'un flux d'échange de type  $ki$  de l'industrie  $i$  pour remplacer le type  $kj$  de l'industrie  $j$  pendant la période  $t$ , voir le Tableau 138.

De plus,  $XIS_{i,ps,t}^{kps,ki}$  signifie la quantité du flux d'auto-échange de type  $ki$  de l'industrie  $i$  à un des procédés des traitements  $ps$  pour remplacer le type  $kps$  au cours d'une période  $t$ , voir le Tableau 139.

Tableau 138. Valeur de variable  $XTT(i,j,ki,kj,t)$  (La quantité de  $j$  de type  $kj$  à  $i$  pour remplacer le type  $ki$  pendant la période  $t$ ).

$XTT(i,j,ki,kj,t)$	Valeur	$XTT(i,j,ki,kj,t)$	Valeur	$XTT(i,j,ki,kj,t)$	Valeur
1.2.13.13.4	10	3.4.13.13.4	20	4.3.10.10.2	63,333
1.5.2.2.2	200	3.6.13.13.1	180	4.3.10.10.3	46,667
1.5.2.2.4	200	3.6.13.13.2	140	4.3.10.10.4	50
1.6.13.13.4	20	4.1.6.6.2	400	4.6.6.6.2	80
2.3.10.10.1	20	4.1.6.6.3	180	4.6.6.6.3	40
2.3.10.10.2	10	4.1.6.6.4	180	4.6.6.6.4	60
2.3.10.10.3	3,333	4.1.9.4.2	180	5.2.13.13.3	60
2.6.6.6.4	20	4.1.9.4.3	120	5.2.13.13.4	60
3.1.6.6.3	20	4.1.9.4.4	100	5.4.13.13.3	200
3.1.6.6.4	20	4.2.12.12.3	100	5.4.13.13.4	200
3.2.7.7.1	50	4.2.12.12.4	200	5.6.13.13.3	200
3.2.7.7.2	100	4.3.6.6.2	3,333	5.6.13.13.4	160
3.2.7.7.3	50	4.3.6.6.4	76,667	6.1.1.1.1	200
3.2.7.7.4	100	4.3.9.9.1	33,333	6.1.1.1.2	80
3.2.13.13.1	30	4.3.9.9.2	33,333	6.1.1.1.4	520
3.2.13.13.2	140	4.3.9.9.3	33,333		
3.4.13.13.1	200	4.3.9.9.4	33,333		
3.4.13.13.2	180	4.3.10.10.1	6,667		

Tableau 139. Valeur de variable  $XIS(i,ps,kps,k,t)$

$XIS(i,ps,kps,k,t)$	Valeur
1.1.2.2.1	100
1.1.2.2.2	100
1.1.2.2.3	100
3.3.7.7.2	100

### 6.4.3. Analyse de amélioration de la résolution

Si nous supposons que les variables des échanges du type  $XTT$  sont du type d'entier, nous pouvons avoir les résultats suivants. Les valeurs des variables indiquées dans le Tableau 111 peuvent être déterminées après la résolution numérique de cet exemple de modèle pour comprendre la situation de ce PEI, par exemple les valeurs du type  $XTT$  sont pour comprendre la situation d'échange entre les industries intérieures de parc et elles sont présentées dans le Tableau 142.

Tableau 140. Temps de calcul.

Logiciel	Temps utilisé (seconde)
Matlab	379,268
GAMS	27,802
CPLEX	6,178
<b>Total</b>	<b>413,248</b>

Tableau 141. Statistique de modèle

Nombre de variables	946
Nombre de variable intégrer	240
Nombre d'équations	710
Nombre d'itérations	106
Objective	5013

En conclure, la situation du PEI est présentée par les variables qui sont résumées dans le Tableau 111. Précisément, les variables suivantes peuvent être déterminées :

- Les variables des processus des industries intérieures au PEI :  $Z_{i,p,t}$ .
- Les quantités des flux d'échange entre les industries intérieures au PEI :  $XTT_{j,i,t}^{kj,ki}$ .
- Les quantités des flux d'auto-échange dans une industrie intérieure au PEI :  $XIE_{i,pe,t}^{kpe,ki}$ ,  $XIS_{i,ps,t}^{kps,ki}$ ,  $XEI_{i,pe,t}^{ki,kpe}$ ,  $XSI_{i,ps,t}^{ki,kps}$ ,  $XES_{i,pe,ps,t}^{kps,ki}$ ,  $XSE_{i,ps,pe,t}^{ki,kps}$ .
- Les quantités des flux d'échange concernant l'extérieure du PEI :  $XDS_{i,t}^{ki}$ ,  $XDE_{i,t}^{ki}$ ,  $XDPEE_{i,pe,t}^{ki}$ ,  $XDPEs_{i,pe,t}^{ki}$ ,  $XDPSE_{i,ps,t}^{ki}$ ,  $XDPSS_{i,ps,t}^{ki}$ .
- Les variables de transport :  $N_{ji,t}$ ,  $XTI_{ji,i,t}$ ,  $XTJ_{ji,j,t}$ .
- Les variables de stockage :  $XI_{i,t}^{ki}$ .

Tableau 142. Valeurs de variable  $XTT(i,j,ki,kj,t)$ .

$XTT(i,j,ki,kj,t)$	Valeur	$XTT(i,j,ki,kj,t)$	Valeur	$XTT(i,j,ki,kj,t)$	Valeur
1.2.13.13.4	100	2.3.10.10.2	100	4.2.12.12.2	100
1.4.13.13.1	100	2.3.10.10.3	50	4.2.12.12.3	75
1.4.13.13.2	100	2.6.6.6.1	50	4.2.12.12.4	75
1.4.13.13.3	100	2.6.6.6.2	50	4.3.6.6.2	40
1.4.13.13.4	100	2.6.6.6.4	100	4.3.9.9.3	100
1.5.2.2.1	100	3.1.6.6.1	100	4.3.9.9.4	33
1.5.2.2.2	100	3.1.6.6.2	100	4.3.10.10.4	50
1.5.2.2.3	100	3.1.6.6.3	100	5.2.13.13.1	100

1.5.2.2.4	100	3.1.6.6.4	100	5.2.13.13.2	100
1.6.13.13.1	100	3.2.7.7.2	100	5.4.13.13.1	100
1.6.13.13.2	100	3.2.7.7.3	100	5.4.13.13.2	100
1.6.13.13.3	100	3.2.7.7.4	100	5.6.13.13.1	100
1.6.13.13.4	100	3.4.13.13.3	100	5.6.13.13.2	50
2.1.6.6.1	100	3.4.13.13.4	100	5.6.13.13.3	50
2.1.6.6.2	100	3.6.13.13.4	100	6.1.1.1.1	100
2.1.6.6.3	100	4.1.9.4.1	100	6.1.1.1.2	100
2.1.6.6.4	100	4.1.9.4.2	100	6.1.1.1.3	100
2.3.6.6.3	20	4.1.9.4.3	100	6.1.1.1.4	100
2.3.6.6.4	20	4.1.9.4.4	100	4.2.12.12.1	50

D'après les valeurs des variables  $XTT(i,ki,t,j,kj)$ , les niveaux d'interaction entre les industries peuvent être calculés.

Les paramètres  $rclient_{j,i}$  représente, pour une industrie de type client, j, le niveau d'interaction avec une industrie de type source, i, par rapport aux autres industries de type source. Les valeurs précises de  $rclient_{j,i}$  de cet exemple sont dans le Tableau 143. Par exemple, pour l'industrie 2, le fournisseur le plus important est l'industrie 1.

Le même principal pour les paramètres  $rsource_{i,j}$  et les paramètres  $rauto_i$ . Les paramètres  $rsource_{i,j}$  représentent, pour une industrie de type source, i, le niveau d'interaction avec une industrie de type client, j, par rapport aux autres industries de type client. Les paramètres  $rauto_i$  représentent, pour une industrie i, le niveau du recyclage intérieur.

$$\forall i \in I, j \in I, rclient_{j,i} = \frac{\left( \sum_{ki, kj \in K, t \in T} XTT_{j,i,t}^{kj,ki} \right)}{\left( \sum_{kj, kl \in K, t \in T, l \in I} XTT_{j,l,t}^{kj,kl} \right)} \quad \text{Équation 104}$$

$$\forall i \in I, j \in I, rsource_{i,j} = \frac{\left( \sum_{ki, kj \in K, t \in T} XTT_{j,i,t}^{kj,ki} \right)}{\left( \sum_{kj, kl \in K, t \in T, l \in I} XTT_{l,i,t}^{kl,ki} \right)} \quad \text{Équation 105}$$

$$\forall i \in I, rauto_i = \frac{(1)}{(2)}$$

$$(1) =$$

$$\sum_{ki \in BO_i, pe \in PE_i, ke \in PEO_i, ps \in PS_i, ks \in PSO_i, t \in T} (production_{i,t}^{ki} + OutputPE_{i,pe,t}^{ke} + OutputPS_{i,ps,t}^{ks})$$

$$- \sum_{ki \in BO_i, pe \in PE_i, ke \in PEO_i, ps \in PS_i, ks \in PSO_i, t \in T} (XDS_{i,t}^{ki} + XDPES_{i,pe,t}^{ke} + XDPSS_{i,ps,t}^{ks} + XTT_{j,i,t}^{kj,k}) \quad \text{Équation 106}$$

$$(2) =$$

$$\sum_{ki \in BO_i, pe \in PE_i, ke \in PEO_i, ps \in PS_i, ks \in PSO_i, t \in T} (production_{i,t}^{ki} + OutputPE_{i,pe,t}^{ke} + OutputPS_{i,ps,t}^{ks})$$

Tableau 143. Niveau de « Relation Client-Source », rclient.

Industrie Client\Industrie Source	1	2	3	4	5	6
1	/	0,07	/	<b>0,31</b>	<b>0,31</b>	<b>0,31</b>
2	<b>0,51</b>	/	0,24	/	/	0,25
3	<b>0,4</b>	0,3	/	0,2	/	0,1
4	<b>0,43</b>	0,33	0,24	/	/	/
5	/	<b>0,33</b>	/	<b>0,33</b>	/	<b>0,33</b>
6	<b>1</b>	/	/	/	/	/

De plus, dans ce PEI, nous pouvons souligner que le type le plus demandé est le type 10. Nous pouvons également souligner que les types 3, 5 et 12 sont les mois recyclés dans ce PEI. Les informations sont utiles pour le développement futur du PEI.



---

---

---

---

# Conclusion

D'une manière générale, l'écologie industrielle est engagée à résoudre les questions liées à l'utilisation des ressources technologiques dans les sociétés, dans le but d'ajouter à la partie des connaissances nécessaires pour commencer à évaluer les problèmes de qualité liés à l'environnement et les questions de disponibilité des ressources.

Un parc éco-industriel est une communauté de fabrication et de service des entreprises situées ensemble sur une propriété commune. Les membres cherchent la performance environnementale, économique et sociale accrue grâce à la collaboration dans la gestion des questions environnementales et de ressource.

La construction d'un parc éco-industriel peut être considérée comme une réalisation de la conception de l'écologie industrielle. Comme l'écologie industrielle est une réponse de l'industrie pour le développement durable, les parcs éco-industriels sont les clés importantes pour trouver un équilibre entre le développement rapide des industries et la protection de l'environnement.

Nous avons étudiés les six parcs éco-industriels symboliques et emblématiques dans le monde. Selon des observations, certains projets célèbres de parcs éco-industriels évoqués antérieurement ont montré que, ils ont commencés dans les années 70 et sont en auto-organisation dans le début de ses développements. Ensuite, le succès du premier parc éco-industriel, parc Kalundborg en Danemark, a recueilli l'attention du gouvernement, l'industrie et la recherche. Parcs éco-industriels sont devenus en mode de planification ou en mode de la combinaison de planification et auto-organisation.

Nous pouvons souligner que, bien qu'un parc éco-industriel ait été lancé par la planification, les opérations quotidiennes d'échanges des flux de ce parc n'ont pas été surveillées. Il n'y a pas assez d'attention quantitative et de la flexibilité dans le concept actuel de parcs éco-industriels. En outre, ces parcs éco-industriels sont statiques. Pour une période de temps si certains changements se produisent dans les parcs, ils ne peuvent pas s'adapter aux défis rapidement.

De plus, d'après l'étude détaillée des dix outils informatiques évoqués précédemment pour les parcs éco-industriels, nous avons remarqué que la plupart de ces outils sont basés sur des systèmes experts, cependant la modélisation et de la programmation mathématique ne sont pas populaires et sont rarement développées dans le domaine d'écologie industrielle, et particulièrement dans l'établissement de parcs éco-industriels. Un résumé des dix outils informatiques mentionné est illustré brièvement dans le Tableau 1, qui est déjà présenté au chapitre 1 de la thèse, ou à voir le tableau suivant, Tableau 144.

D'après l'étude détaillée des modèles d'optimisation de parc éco-industriel, nous pouvons souligner que, au contraire de les études développées fortement sur les modèles de l'optimisation du réseau du certain type de flux de matériel, très peu

d'études proposent une modélisation générale pour optimiser les flux des échanges. Un résumé de modèles d'optimisation pour un parc éco-industriel est présenté dans la section 1.5.2.

Tableau 144. Taxonomie d'outils informatiques pour parcs éco-industriels.

Nom d'outil informatique	Pays	Programmation Mathématique (Modélisation/Optimisation)
Presteo	Suisse	Non
IEPT	États-Unis	Oui (Programmation linéaire)
e-Symbiosis	Royaume-Uni/Grèce	Non
IUWAWM	Allemane	Non
MatchMaker!	États-Unis	Non
SymbioGIS	Suisse	Non
RUES	États-Unis	Non
DIME	États-Unis	Oui (Système dynamique)
KBDSS	Nouvelle-Zélande /Canada	Non
CRISP	Royaume-Uni	Non

Le captage et stockage du carbone (CSC) est une technologie qui permet de capturer le dioxyde de carbone présent, par exemple dans les fumées, pour obtenir du dioxyde de carbone fortement concentré. La technologie de carbone captage et réutilisation (CCU) peut favoriser la réutilisation industrielle de CO<sub>2</sub> pour réduire la pollution par les gaz à effet de serre et créer les bénéfices économiques simultanément. Pour les parcs éco-industriels, CSC et CCU sont les clés pour créer des réseaux d'utilisation de CO<sub>2</sub> qui pourrait améliorer considérablement les performances des parcs éco-industriels. Les résumés de CSC et CCU sont réalisés à la fin au chapitre 2 de la thèse.

Nous avons mentionné que l'objectif de la thèse est de créer des modèles mathématiques d'optimisation pour maximiser des flux des échanges dans un parc éco-industriel et pour réduire les impacts négatifs des industries sur l'environnement. Des modélisations de type « modèle I », « modèle II » et « modèle III » sont proposées dans la thèse. Un résumé de trois modèles est présenté dans la suite du texte et illustré brièvement dans le Tableau 141.

Dans le modèle I, une industrie peut être considérée soit comme une industrie de type fournisseur soit comme une industrie de type client dans un parc éco-industriel à développer. Dans ce modèle, la partie de stockage n'est pas prise en considération et elle n'est pas incluse dans la modélisation. Les industries de type client peuvent avoir les options de réceptions fixes et flexibles. L'option de réception fixe représente la quantité de la demande d'un matériel fixé et doit être satisfaite obligatoirement. L'option de réception flexible représente la quantité de la demande d'un matériel non fixé et peut s'adapter aux situations de fourniture réelle à l'intérieur du PEI étudié,

noté comme ‘Option Réception Flexible’. Le modèle I est statique par rapport au temps.

Dans le modèle II, au contraire du modèle I, une industrie peut être considérée en tant qu’industrie de type fournisseur et de type client. Les difficultés pour l’établissement et le développement d’un parc éco-industriel sont principalement l’identification des flux de matière ou d’énergie et la performance économique des industries. Il semble improbable que les flux d’échange puissent satisfaire complètement les besoins des industries bénéficiaires dans la réalité. Donc, les trois options suivantes étaient prises en compte et ajoutées dans la modélisation de modèle II : l’option de remplacement de matériel, noté comme ‘Option Matériel Remplacement’ ; l’option de processus de traitement, noté comme ‘Option Traitement’ ; et l’option de partage de coût de transport, noté comme ‘Option Transport Partage’. Le modèle II est dynamique au niveau du temps et les paramètres peuvent évoluer et peuvent être modifiés avec le temps pour s’approcher de la réalité. Par hypothèse, seules les industries fournisseurs peuvent avoir les possibilités des traitements des matériaux. Ceci signifie qu’après réception d’un flux de matériel, les industries clients ne peuvent les utiliser que directement.

Dans le modèle III, sa conception est basée sur celle de modèle II. Comme le modèle II, une industrie dans le modèle III peut être aussi considérée en tant qu’industrie fournisseur et industrie client. Et, les options de remplacement de matériel, de processus de traitement et de partage de coût de transport ont été également ajoutées dans la modélisation. Le modèle III est dynamique au niveau de temps. Au contraire de modèle II, la possibilité d’auto-recyclage est prise en compte dans cette nouvelle modélisation.

Tableau 145. Résumé de trois modèles.

	<b>Modèle I</b>	<b>Modèle II</b>	<b>Modèle III</b>
Double rôles d’une industrie (fournisseur et client)	Non	Oui	Oui
Option Réception Flexible	Oui	Non	Non
Option Matériel Remplacement	Non	Oui	Oui
Option Traitement S (les traitements pour les flux sortants.)	Non	Oui	Oui
Option Traitement E (les traitements pour les flux entrants.)	Non	Non	Oui
Option Transport Partage	Oui	Oui	Oui
Stockage	Non	Oui	Oui
Contact avec des industries extérieures	Oui	Oui	Oui
Auto-recyclage	Non	Non	Oui
Multi-périodes	Non	Oui	Oui
Analyse de niveaux d’interaction entre des industries	Oui	Oui	Oui

---

Les modèles sont des programmes linéaires mixtes de type MILP <<Mixed Integer Linear Programming>>. Le traitement des données initiales a été réalisé sous l'environnement de Matlab Version 7.8.0 R2009a. Les données traitées sont transformées en format compatible avec l'environnement de GAMS Version Win32 23.8.2 pour pouvoir les mettre sous forme d'un modèle linéaire mixte. La solution optimale de ce modèle linéaire mixte est déterminée en utilisant le solveur IBM ILOG CPLEX Version 12.4.0.0. CPLEX utilise un algorithme de Branch-and-Cut qui résout une série de sous-problèmes de programmation linéaire. Les simulations numériques sont effectuées sur un PC DELL équipé d'un processeur de type : Intel(R) Core(TM) 2 Duo CPU, P7450, 2,13GHz.

---

# Production scientifique

## **Publications dans des revues internationales avec comité de lecture :**

1. "Modeling and optimization of material/energy flow exchanges in an eco-industrial park".

Chao GU, Sébastien LEVENEUR, Lionel ESTEL, Adnan YASSINE.  
"Energy Procedia Journal", Volume 36, 2013, Pages 243-252.

## **Communications dans des conférences avec actes publiés :**

### **Conférences Internationales :**

1. "Modeling and optimization of material/energy flow exchanges in an industrial park in order to reduce the negative impacts on the environment."

Chao GU, Sebastian LEVENEUR, Lionel ESTEL, Adnan YASSINE.  
TerraGreen13, Energy Procedia Journal, ISSN: 1876-6102, Beyrouth-Liban,  
15-18/02/2013.

2. "Industrial Symbiosis Optimization Control Model for the exchanges of the material/energy flows in an industrial production park."

Chao GU, Sebastian LEVENEUR, Lionel ESTEL, Adnan YASSINE.  
7th IFAC Conference (International Federation of Automatic Control) on  
Manufacturing Modelling Management and Control, Saint Pétersburg-Russie,  
19-21/06/2013.  
Proceedings Manufacturing Modelling, Management, and Control, Volume # 7 | Part#  
1, Pages 1015-1020. ISBN: 978-3-902823-35-9, ISSN: 1474-6670,  
DOI:10.3182/20130619-3-RU-3018.00182.

3. "A Multiobjective Optimization Model for Designing and Optimizing an Ecological Industrial Park."

Chao GU, Adnan YASSINE, Sebastien LEVENEUR, Lionel ESTEL.  
ICNC-FSKD13 Conference on Natural Computation, Proceedings ICNC13, Pages  
595 - 600, inclus dans IEEE Xplore, indexée par EI Compendex, Shenyang-Chine,  
23-25/07/2013. DOI :10.1109/ICNC.2013.6818046.

4. "Multi-Objective Optimization for Industrial Ecology: Design and Optimize Exchange Flows in an Industrial Park"

Chao GU, Adnan YASSINE, Lionel ESTEL, Sebastien LEVENEUR.  
EUROPMENT Conferences on Applied Mathematics and Computational Methods 13,  
Proceedings of the 2013 International Conference on Applied Mathematics and  
Computational Methods, Venice-Italy, 28-30/09/2013. ISBN: 978-1-61804-208-8.

---

**Conférence Nationale :**

1. "Modélisation et optimisation d'échange de flux matière/énergie dans un parc éco-industriel."

Journées SMAI-MODE (Société de Mathématiques Appliquées et Industrielles -Mathématiques de l'Optimisation et de la Décision), 28-30/03/2012, Dijon.

**Séminaires :**

1. Séminaire international du Chaire CTSC (Captage, Transport et Stockage du CO<sub>2</sub>), 25-27/03/2013, Paris et le Havre.
2. Séminaire du Chaire CTSC (Captage, Transport et Stockage du CO<sub>2</sub>), 15/05/2013, Paris.

---

## Références

- [1] I. Burton, «Report on reports: Our common future: The world commission on environment and development», *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, vol. 29, n° 15, pp. 25-27, 1987.
- [2] R. A. Forsh et N. E. Gallopoulos, «Strategies for manufacturing», *Sci Am*, vol. 261, pp. 144-152, 1989.
- [3] R. A. Frosch, «Industrial ecology: minimizing the impact of industrial waste», *Phys Today*, vol. 47, n° 111, pp. 63-68, 1994.
- [4] A. L. Ernest et K. E. Laurence, «Industrial ecology and industrial ecosystems», *J. Cleaner Prod.*, vol. 3, n° 11-2, pp. 47-53, 1995.
- [5] S. Erkman, «Industrial ecology: an historical view», *J. Cleaner Prod*, vol. 5, n° 11-2, pp. 1-10, 1997.
- [6] E. M. Harper et T. E. Graedel, «Industrial ecology: a teenager's progress», *Technology in Society*, vol. 26, pp. 433-445, 2004.
- [7] A. Agarwal et P. Strachan, «Is Industrial Symbiosis only a Concept for Developed Countries?», *The Journal for Waste & Resource Management Professionals. The Chartered Institution of Wastes Management.*, vol. 42, pp. 42-43, 2008.
- [8] A. L. Ernest, *Eco-industrial park handbook for Asian developing countries*, Chemical Industry Press, 2001.
- [9] R. Côté et J. Hall, «Industrial parks as ecosystems», *Journal of Cleaner Production*, vol. 3, n° 11-2, pp. 41-46, 1995.
- [10] A. L. Ernest, «Creating by-product resources exchanges: strategies for eco-industrial parks», *Journal of Cleaner Production*, vol. 5, n° 11-2, pp. 57-65, 1997.
- [11] R. U. Ayres et L. W. Ayres, *Handbook of Industrial Ecology*, Edward Elgar Publishing, 2002.
- [12] N. B. Jacobsen, «Industrial Symbiosis in Kalundborg, Denmark, A Quantitative Assessment of Economic and Environmental Aspects», *Journal of Industrial Ecology*, vol. 10, pp. 239-255, 2006.



- 
- [13] D. Van Beers et W. K. Biswas, «A regional synergy approach to energy recovery: The case of the Kwinana insutrial area, Western Australia», *Energy Conversion and Management*, vol. 49, pp. 3051-3062, 2008.
- [14] D. Van Beers, A. Bossilkov et C. Lund, «Developmebt of large scale reuses of inorganic ly-products in Australia: The case study of Kwinana», *Conservation and Recycling*, vol. 53, pp. 365-378, 2009.
- [15] D. Van Beers, G. D. Corder, A. Bossilkov et R. Van Berkel, «Regional synergies in the Australian minerals industry: Case-studies and enabling tools», *Minerals Engineering*, vol. 20, pp. 830-841, 2007.
- [16] D. Van Beers, «Cleaner production and eco-efficiency initiatives in Western Australia 1996–2004», *Journal of Cleaner Production*, vol. 15, n° 18, pp. 741-755, 2007.
- [17] R. Van Berkel, T. Fujita, S. Hashimoto et M. Fuji, «Quantitative Assessment of Urban and Industrial Symbiosis in Kawasaki, Japan», *Environ. Sci. Technol*, vol. 43, pp. 1271-1281, 2009.
- [18] L. Dong, h. Zhang, T. Fujita, S. Ohnishi, h. Li, M. Fuji et H. Dong, «Environmental and economic gains of industrial symbiosis for Chinese iron/steel industry: Kawasaki's experience and practice in Liuwhou and Jinan», *Journal of Cleaner Production*, vol. 59, pp. 226-238, 2013.
- [19] H. Shi, M. Chertow et Y. Song, «Developing country experience with eco-industrial parks: a case study of the Tianji Economic-Techonological Development Area in China», *Journal of Cleaner Production*, vol. 18, pp. 191-199, 2010.
- [20] Y. Geng, Q. Zhu et M. Haight, «Planning for integrated solid waste management at the industrial park level: A case of Tianji,China», *Waste Management*, vol. 27, pp. 141-150, 2007.
- [21] Q. Zhu et R. P. Cote, «Integrating green supply chain management into an embryonic eco-industrial development: a case study of the Guitang Group», *Journal of Cleaner Production*, vol. 12, pp. 1025-1035, 2004.
- [22] Q. Zhu, A. L. Ernest, Y. a. Wei et D. Barnes, «Industrial Symbiosis in China A Case Study of the Guitang Group», *Journal of Industrial Ecology*, vol. 11, pp. 31-42, 2008.
- [23] P. J. Deschenes et M. Chertow, «An Island Approach to Industrial Ecology: Towards Sustainability in the Island Context», *Journal of Environmental Planning and Management*, vol. 47, pp. 201-217, 2004.

- 
- [24] M. R. Chertow et D. R. Lombardi, «Quantifying Economic and Environmental Benefits of Co-Located Firms», *Environmental Sciences & Technology*, vol. 39, n° 117, pp. 6535-6541, 2005.
- [25] M. R. Chertow, W. S. Ashton et J. C. Espinosa, «Industrial Symbiosis in Puerto Rico: Environmentally Related Agglomeration Economies», *Regional Studies*, vol. 42, n° 110, pp. 1299-1312, 2008.
- [26] M. R. Chertow, «INDUSTRIAL SYMBIOSIS: Literature and Taxonomy», *Annu. Rev. Energy. Environ*, vol. 25, pp. 313-337, 2000.
- [27] S. Sudholter, M. A. Reuter et J. Kruger, «Eco-techono-economic synthesis of process routes for the production of zinc using combinatorial optimisation», *Metallurgical Transactions B*, vol. 27, n° 16, pp. 1031-1044, 1996.
- [28] T. Spengler, H. Puchert, T. Penkuhn et O. Rentz, «Environmental integrated production and recycling management», chez *Produktion und Umwelt*, Springer Berlin Heidelberg, 1997, pp. 239-257.
- [29] A. I. Barros, R. Dekker et V. Scholten, «A two level network for recycling sand: A case study», *European Journal of Operational Research*, vol. 110, n° 12, pp. 199-214, 1998.
- [30] E. Solano, S. R. Ranjithan, M. A. Barlaz et E. D. Brill, «Life-cycle based solid waste management. I: Model development», *Journal of Environmental Engineering*, vol. 128, n° 110, pp. 981-992, 2002.
- [31] T. Penkuhn, T. Spengler, H. Puchert et O. Rentz, «Environmental integrated production planning for the ammonia synthesis», *European Journal of Operational Research*, vol. 97, n° 12, pp. 327-336, 1997.
- [32] D. Louwers, J. K. Bert, E. Peters, F. Souren et S. D. P. Flapper, «A facility location allocation model for reusing carpet materials», *Computers & Industrial Engineering*, vol. 36, pp. 855-869, 1999.
- [33] M. Karlsson et A. Wolf, «Using an optimization model to evaluate the economic benefits of industrial symbiosis in the forest industry», *Journal of Cleaner Production*, vol. 16, pp. 1536-1544, 2008.
- [34] L. Sokka, S. Pakarinen et M. Melanen, «Industrial symbiosis contributing to more sustainable energy use-an example from the forest industry in Kymenlaakso, Finland», *Journal of Cleaner Production*, vol. 19, pp. 285-293, 2011.

- 
- [35] M. Bagajewicz et M. Savelski, «On the use of linear models for the design of water utilization systems in process plants with a single contaminant», *Trans I Chem E*, vol. 79, n° 15, pp. 600-610, 2001.
- [36] A. Alva-Argaez, A. C. Kokossis et R. Smith, «Wastewater minimisation of industrial systems using an integrated approach», *Computers Chem Engng*, vol. 22, pp. 741-744, 1998.
- [37] S. E. Keckler et D. T. Allen, «Material Reuse Modeling: A Case Study of Water Reuse in an Industrial Park», *Journal of Industrial Ecology*, vol. 2, n° 14, 1999.
- [38] S. J. Doyle et R. Smith, «Targeting Water Reuse With Multiple Contaminants», *Trans I Chem E*, vol. 75, n° 13, pp. 181-189, 1999.
- [39] L. Zhou, S. Y. Hu, Y. R. Li, Y. Jin et X. L. Zhang, «Modeling and Optimization of a Coal-Chemical Eco-industrial System in China», *Journal of Industrial Ecology*, vol. 16, n° 11, pp. 105-118, 2012.
- [40] M. Boix, L. Montastruc, C. Azzaro-Pantel et S. Domenech, «Optimization methods applied to the design of eco-industrial parks: a literature review», *Journal of Cleaner Production*, vol. 87, pp. 303-317, 2015.
- [41] G. B. Grant, T. P. Seager, G. Massard et L. Nies, «Information and Communication Technology for Industrial Symbiosis», *Journal of Industrial Ecology*, vol. 14, n° 15, 2010.
- [42] I. E. Inc, «Applying decision support tools for eco-industrial park planning-A case study in Burlington, Vermont», Cambridge University Press, 1998.
- [43] R. Young, «By-product synergy: A demonstration project-Tampico, Mexico», *Journal of Business Administration and Policy Analysis*, vol. 1999, n° 11, pp. 459-474, 1999.
- [44] A. Clayton, J. Muirhead et H. Reichgelt, «Enabling industrial symbiosis through a web-based waste exchange», *Greener Management International*, vol. 40, pp. 93-106, 2002.
- [45] J. Kincaid, «Industrial ecosystem development project report», Triangle J Council of Governments, USA, 1999.
- [46] P. D. Jensen, L. Basson, E. E. Hellowell, M. R. Bailey et M. Leach, «Quantifying 'geographic proximity': Experiences from the United Kingdom's National Industrial Symbiosis Programme», *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 55, pp. 703-712, 2011.

- 
- [47] M. Mirata, «Experiences form early stages of a national industrial symbiosis programme in the UK: derterminats and coordination challenges», *Journal of Cleaner Production*, vol. 12, pp. 967-983, 2004.
- [48] G. Masard et S. Erkman, «A web-GIS tool for indsutrial symbiosis-Preliminary results and perspectives», chez *23rd International Conference on Informatics and Environmental Protection*, 2009.
- [49] T. Sterr et T. Ott, «The indsutrial region as a promising unit for eco-industrial development-reflections, practical experience and establishment of innovative instruments to support indsutrial ecology», *Journal of Cleaner Production*, vol. 12, pp. 947-965, 2004.
- [50] F. Cecelja, T. Raafat, N. Trokanas, S. Innes, M. Smith, A. Yang, Y. Zoraios, A. Korkofygas et A. Kokossis, «e-Symbiosis: technology-enabled support for Industrial Symbiosis targeting Small and Medium Entreprises and innovation», *Journal of Cleaner Production*, vol. 98, pp. 336-352, 2015.
- [51] D. J. Fonseca, E. Richards, D. Williamson et G. P. Moynihan, «A knowkedge-based system for the recycling of non-hazardous industrial residuals in civil engineering applications», *Expert Systems*, vol. 22, n° 11, pp. 1-11, 2005.
- [52] C. E. Nobel et D. T. Allen, «Using geographic information systems GIS in Industrial Water Reuse Modelling», *Trans IChemE*, vol. 78, n° 14, pp. 295-303, 2000.
- [53] J. Brown, D. Gross et L. Wiggs, «The MatchMaker! System: Creating Virtual Eco-Industrial Parks», 1997. [En ligne]. Available: <http://environment.yale.edu/publication-series/documents/downloads/0-9/106matchmaker.pdf>.
- [54] D. E. Shropshire, D. A. Cobb, P. Worhach, J. J. Jacobson et S. Berrett, «Demonstration of Decision Support Tools for Suistainable Development An Application on Alternative Fuels in the Greater Yellowstone-Teton Region», 2000.
- [55] G. Massard et S. Erkman, «A regional Industrial Symbiosis methodology and its implementation in Geneva, Switzerland», 2007. [En ligne]. Available: [http://www.lcm2007.ethz.ch/paper/51\\_2.pdf](http://www.lcm2007.ethz.ch/paper/51_2.pdf).
- [56] C. Adoue et L. Georgeault, «Ecologie industrielle, économie de la fonctionnalité, positionnement et perspectives communes», *Développement durable et territoires*, vol. 5, n° 11, 2014.
- [57] C. A. Boyle et B. W. Baetz, «A prototype knowledge-based decision support system for

---

industrial waste management: part I. The decision support system.», *Waste Management*, vol. 18, n° 12, pp. 87-97, 1998.

- [58] C. A. Boyle et B. W. Baetz, «A Prototype knowledge-based decision support system for Industrial Waste Management: Part II. Application to A Trinidadian Industrial Estate Case Study.», *Waste Management*, vol. 17, n° 17, pp. 411-428, 1997.
- [59] Advisory Council of the European Technology Platform for Zero Emission Fossil Fuel Power Plants, *The Costs of CO2 Capture, Transport and Storage*, 2009.
- [60] H. Pershad, E. Standen, E. Durusut et S. Slater, «The costs of carbon capture and sotrage CCS for UK industry», 2013. [En ligne]. Available: [https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/181161/bis-13-745-the-costs-of-carbon-capture-and-storage-for-uk-industry-a-high-level-review.pdf](https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/181161/bis-13-745-the-costs-of-carbon-capture-and-storage-for-uk-industry-a-high-level-review.pdf).
- [61] B. Metz, *Carbon dioxide capture and storage: special report of the intergovernmental panel on climate change.*, Cambridge University Press, 2005.
- [62] M. J. Knoope, A. Ramirez et A. C. Faaij, «A state of the art review of techno-economic models predicting the costs of CO2 pipeline transport», *Greenhouse Gas Control*, vol. 16, pp. 241-279, 2013.
- [63] R. Svensson, M. Odenberger, F. Johnsson et L. Stromberg, «Transportation systems for CO2 - application to carbon capture and storage», *Energy Conversion and Management*, vol. 45, pp. 2343-2353, 2004.
- [64] Toyo Engineering Corporation, «CO2 Capture and Storage (CCS)», [En ligne]. Available: <http://www.toyo-eng.com/jp/en/products/environment/ccs/>.
- [65] J. David et H. Herzog, «The cost of carbon capture», 2000. [En ligne]. Available: [http://sequestration.mit.edu/pdf/David\\_and\\_Herzog.pdf](http://sequestration.mit.edu/pdf/David_and_Herzog.pdf).
- [66] R. T. Dahowski, C. L. Davidson, X. C. Li et N. Wei, «A \$70/t CO2 greenhouse gas mitigation backstop for China's industrial and electric power sectors: Insights from a comprehensive CCS cost curve», *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 11, pp. 73-85, 2012.
- [67] M. Finkenrath, «Cost and Performance of Carbon Dioxide Capture from Power Generation», ISSN :2079-2581 DOI:10.1787/20792581, 2011.
- [68] P. Brinckerhoff, «Accelerating the Uptake of CCS: Industrial Use of Captured Carbon

---

Dioxide», Global CCS Institute, 2011.

- [69] P. M. Feron et C. A. Hendriks, «CO<sub>2</sub> capture process principles and costs», *Oil & Gas Science and Technology*, vol. 3, pp. 451-459, 2005.
- [70] M. Al-Juaied et A. Whitmore, «Realistic Costs of Carbon Capture», 2009.
- [71] S. T. McCoy et E. S. Rubin, «An engineering-economic model of pipeline transport of CO<sub>2</sub> with application to carbon capture and storage», *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 2, n° 12, pp. 219-229, 2008.
- [72] J. Serpa, J. Morbee et E. Tzimas, «Technical and Economic Characteristics of a CO<sub>2</sub> Transmission Pipeline Infrastructure», ISBN:978-92-79-19425-2 ISSN 1018-5593 doi:10.2790/30861, 2011.
- [73] S. T. McCoy, *The Economics of CO<sub>2</sub> Transport by Pipeline and Storage in Saline Aquifers and Oil Reservoirs*, ProQuest, 2008.
- [74] O. De Queiroz F. Araujo, J. L. De Medeiros et R. M. B. Alves, *CO<sub>2</sub> Utilization: A Process Systems Engineering Vision*, 2014.
- [75] T. M. Mata, A. A. Martins et N. S. Caetano, «Microalgae for biodiesel production and other applications: A review», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, pp. 217-232, 2010.
- [76] B. Wang, Y. Li, N. Wu et C. Q. Lan, «CO<sub>2</sub> bio-mitigation using microalgae», *Appl Microbiol Biotechnol*, vol. 79, pp. 707-718, 2008.
- [77] D. A. Roberts, R. De Nys et N. A. Paul, «The effect of CO<sub>2</sub> on Algal Growth in Industrial Waste Water for Bioenergy and Bioremediation Applications», *PLoS ONE*, vol. 8, n° 111, 2013.
- [78] K. Sudhakar, S. Suresh et M. Premalatha, «An overview of CO<sub>2</sub> mitigation using algae cultivation technology», *International Journal of Chemical Research*, vol. 3, pp. 110-117, 2011.
- [79] A. Bhatnagar, S. Chinnasamy, M. Singh et K. C. Das, «Renewable biomass production by mixotrophic algae in the presence of various carbon sources and wastewaters», *Applied Energy*, vol. 88, pp. 3425-3431, 2011.
- [80] C. Hendriks, P. Noothout, P. Zakkour et G. Cook, «Implication of the Reuse of Captured CO<sub>2</sub> for European Climate Action Policies», ECOFYS Netherlabds B.V., 2013.

- 
- [81] P. Styring, D. Jansen, H. De Coninck, H. Reith et K. Armstrong, «Carbon Capture and Utilisation in the green economy», Centre for Low Carbon Futures, 2011.
- [82] E. A. Quadrelli, G. Centi, J.-L. Duplan et S. Perathoner, «Carbon Dioxide Recycling: Emerging Large-Scale Technologies with Industrial Potential», *ChemSusChem*, vol. 4, pp. 1194-1215, 2011.
- [83] R. Zevenhoven, J. Fagerlund, E. Nduagu, I. Romao, B. Jie et J. Highfield, «Carbon storage by mineralisation: Serpentine rock carbonation via Mg(OH)<sub>2</sub> reaction intermediate without CO<sub>2</sub> pre-separation», *Energy Procedia*, vol. 37, pp. 5945-5954, 2013.
- [84] R. Zevenhoven, J. Fagerlund et J. K. Songok, «CO<sub>2</sub> mineral sequestration: developments towards large scale application», *Greenhouse Gas Sci Technol*, vol. 1, n° 11, pp. 48-57, 2011.
- [85] C. Cardenas-Escudero, V. Morales-Florez, R. Perez-Lepez, A. Santos et L. Esquivias, «Procedure to use phosphogypsum industrial waste for mineral CO<sub>2</sub> sequestration», *Journal of Hazardous Materials*, vol. 196, pp. 431-435, 2011.
- [86] S. Eloneva, Reduction of CO<sub>2</sub> emissions by mineral carbonation: steelmaking slags as raw material with a pure calcium carbonate end product, Aalto University ISSN (pdf): 1795-4584 , 2010.
- [87] S. Mignardi, C. De Vito, V. Ferrini et R. F. Martin, «The efficiency of CO<sub>2</sub> sequestration via carbonate mineralization with simulated wastewaters of high salinity», *Journal of Hazardous Materials*, vol. 191, pp. 49-55, 2011.
- [88] A. Sanna, M. Dri, M. R. Hall et M. Maroto-Valer, «Waste materials for carbon capture and storage by mineralisation-A UK perspective», *Applied Energy*, vol. 99, pp. 545-554, 2012.
- [89] M. Fernanades Bertos, S. R. Simons, C. D. Hills et P. J. Carey, «A review of accelerated carbonation technology in the treatment of cement-based materials and sequestration of CO<sub>2</sub>», *Journal of Hazardous Materials*, vol. 112, n° 13, pp. 193-205, 2004.
- [90] E. R. Bobicki, Q. Liu, Z. Xu et H. Zeng, «Carbon capture and storage using alkaline industrial wastes», *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 38, pp. 302-320, 2012.
- [91] M. Gimenez, «Harnessing CO<sub>2</sub>», Tradeship Publications Ltd (INTERNATIONAL CEMENT REVIEW) , 2015.
- [92] H. H. Khoo, P. N. Sharratt, J. Bu, T. Y. Yeo, A. Borgna, J. G. Highfield, T. G. Bjorklof et R. Zevenhoven, «Carbon Capture and Mineralization in Singapore: Preliminary Environmental

---

Impacts and Costs via LCA», *Ind Eng Chem Res*, vol. 50, pp. 11350-11357, 2011.

- [93] M. Johnston, M. W. Clark, P. McMahon et N. Ward, «Alkalinity conversion of bauxite refinery residues by neutralization», *Journal of Hazardous Materials*, vol. 182, pp. 710-715, 2010.
- [94] S. Khaitan, D. A. Dzombark et G. Lowry, «Chemistry of the Acid Neutralization Capacity of Bauxite Residue», *Environmental Engineering Science*, vol. 26, n° 15, 2009.
- [95] C. Klauber, M. Grafe et G. Power, «Bauxite residue issues: II. options for residue utilization», *Hydrometallurgy*, vol. 108, pp. 11-32, 2011.
- [96] R. C. Sahu, R. K. Patel et B. C. Ray, «Neutralization of red mud using CO<sub>2</sub> sequestration cycle», *Journal of Hazardous Materials*, vol. 179, pp. 28-34, 2010.
- [97] S. Rai, K. L. Wasewar, J. Mukhopadhyay, C. K. Yoo et H. Uslu, «Neutralization and utilization of red mud for its better waste management», *Arch Environ Sci*, vol. 6, pp. 5410-5430, 2012.
- [98] S. Khaitan, D. A. Dzombak et G. V. Lowry, «Mechanisms of Neutralization of Bauxite Residue by Carbon Dioxide», *Journal of Environmental Engineering*, vol. 135, n° 16, pp. 433-438, 2009.
- [99] G. Power, M. Grafe et C. Klauber, «Bauxite residue issues: I. Current management, disposal and storage practices», *Hydrometallurgy*, vol. 108, pp. 33-45, 2011.
- [100] M. Grafe, G. Power et C. Klauber, «Bauxite residue issues: III. Alkalinity and associated chemistry», *Hydrometallurgy*, pp. 60-79, 2011.
- [101] Centre for Sustainable Resource Processing, «Bauxite Residue Sustainability Assessment: Technical, Community Consultation, Benefit-Cost and Risk Assessment», 2010.
- [102] D. L. Tomasko, H. Li, D. Liu, X. Han, M. J. Wingert, L. J. Lee et K. W. Koelling, «A review of CO<sub>2</sub> Applications in the Processing of Polymers», *Ind Eng Chem Res*, vol. 42, n° 125, pp. 6431-6456, 2003.
- [103] C. D. Wood, A. I. Cooper et J. M. DeSimone, «Green synthesis of polymers using supercritical carbon dioxide», *Current Opinion in Solid State and Materials Sciences*, vol. 8, n° 15, pp. 325-331, 2004.
- [104] E. J. Bechman, «Supercritical and near-critical CO<sub>2</sub> in green chemical synthesis and



- 
- processing», *J. of Supercritical Fluids*, vol. 28, pp. 121-191, 2004.
- [105] S. P. Nalawade, F. Picchioni et L. B. Janssen, «Supercritical carbon dioxide as a green solvent for processing polymer melts: Processing aspects and applications», *Prog Polym Sci*, pp. 19-43, 2006.
- [106] A. I. Cooper, «Polymer synthesis and processing using supercritical carbon dioxide», *J. Mater.Chem*, vol. 10, n° 12, pp. 207-234, 2000.
- [107] J. L. Kendall, D. A. Canelas, J. L. Young et J. M. DeSimone, «Polymerizations in Supercritical Carbon Dioxide», *Chem Rev*, vol. 99, n° 12, pp. 543-563, 1999.
- [108] M. Kemmere, *Supercritical Carbon Dioxide for Sustainable Polymer Process*, Wiley & Sons, 2005.
- [109] Novomer Inc, «Catalytic Transformation of Waste CO<sub>2</sub> into Valuable Products», 2013.
- [110] S. Monkman et R. Niven, «Integration of Carbon Dioxide Curing Into Precast Concrete Production», 2010.
- [111] G. Centi et S. Perathoner, «Opportunities and prospects in the chemical recycling of carbon dioxide to fuels», *Catalysis Today*, vol. 148, pp. 191-205, 2009.
- [112] G. A. Olah, A. Goepfert et G. K. Surya Prakash, «Chemical Recycling of Carbon Dioxide to Methanol and Dimethyl Ether: From Greenhouse Gas to Renewable, Environmentally Carbon Neutral Fuels and Synthetic Hydrocarbons», *J.Org.Chem.*, vol. 74, pp. 487-498, 2009.
- [113] W. Leitner, «Carbon Dioxide as a Raw Material: The Synthesis of Formic Acid and Its Derivatives from CO<sub>2</sub>», *Angew.Chem.Int.Ed.Engl*, vol. 34, n° 120, pp. 2207-2221, 1995.
- [114] D. Mignard, M. Sahibzada, J. M. Duthie et H. W. Whittington, «Methanol synthesis from flue-gas CO<sub>2</sub> and renewable electricity: a feasibility study», *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 28, pp. 455-464, 2003.
- [115] Mantra Venture Group, «An alternative to carbon sequestration: Electroreduction of CO<sub>2</sub>», 2010.
- [116] M. Iijima, T. Nagayasu, T. Kamijyo et S. Nakatani, «MHI's Enerby Efficient Flue Gas CO<sub>2</sub> Capture Technology and Large Scale CCS Demonstration Test at Coal-Fired Power Plants in USA», *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*, vol. 48, n° 11, pp. 26-33, 2011.

- 
- [117] M. Iijima, T. Nagayasu, T. Kamijyo, S. Kishimoto et S. Nakatani, «Large-scale Carbon Dioxide Capture Demonstration Project at a Coal-fired Power Plant in the USA», *Mistubishi Heavy Industries Technical Review*, vol. 49, n° 11, pp. 37-43, 2012.
- [118] J. C. Copplestone et C. M. Kirk, «Ammonia and Urea Production», [En ligne]. Available: <http://nzic.org.nz/ChemProcesses/production/>.
- [119] A. Land et A. Doig, «An automatic method for solving discrete programming problems.», *Econometrica*, vol. 28, pp. 497-520, 1960.
- [120] A. Schrijver, *Theory of linear and integer programming*, Wiley and Sons, 1986.
- [121] D.-S. Chen, R. G. Batson et Y. Dang, *Applied Integer Programming*, Wiley & Sons, 2010.
- [122] Ed Rothberg (ILOG Inc), «The CPLEX Library: Presolve and Cutting Planes», [En ligne]. Available: [http://resources.mpi-inf.mpg.de/conferences/adfocs-03/Slides/Rothberg\\_4.pdf](http://resources.mpi-inf.mpg.de/conferences/adfocs-03/Slides/Rothberg_4.pdf).
- [123] A. Mahajan, «Presolving Mixed-Integer Linear Programs», 2010. [En ligne]. Available: [www.mcs.anl.gov/papers/P1752.pdf](http://www.mcs.anl.gov/papers/P1752.pdf).
- [124] M. Savelsbergh, «Preprocessing and Probing Techniques for Mixed Integer Programming Problems,» *ORSA Journal on Computing*, vol. 6, n° 14, pp. 445-454, 1994.
- [125] K. Martin, «Integer Programming», 2014. [En ligne]. Available: <http://faculty.chicagobooth.edu/kipp.martin/root/htmls/coursework/36900/handouts/integerProgPartII.pdf>.
- [126] J. E. Mitchell, *Branch-and-Cut Algorithms for Combinatorial Optimization Problems (Handbook of Applied Optimization)*, Oxford University Press, 1999.
- [127] Ed Rothberg (ILOG Inc), «The CPLEX library: MIP Heuristics.», [En ligne]. Available: [http://resources.mpi-inf.mpg.de/conferences/adfocs-03/Slides/Rothberg\\_3.pdf](http://resources.mpi-inf.mpg.de/conferences/adfocs-03/Slides/Rothberg_3.pdf).
- [128] E. Danna, E. Rothberg et C. Le Pape, «Exploring relaxation induced neighborhoods to improve MIP solutions.», *Mathematical Programming*, vol. 102, n° 11, pp. 71-91, 2005.
- [129] E. Rothberg, «An evolutionary algorithm for polishing Mixed Integer Programming Solutions», *INFORMS Journal On Computing*, vol. 19, n° 14, pp. 534-541, 2007.
- [130] R. Lima, «IBM ILOG CPLEX What is inside of the box?», 2010. [En ligne]. Available:

---

[http://egon.cheme.cmu.edu/ewocp/docs/rlima\\_cplex\\_ewo\\_dec2010.pdf](http://egon.cheme.cmu.edu/ewocp/docs/rlima_cplex_ewo_dec2010.pdf).

- [131] M. Fischetti et A. Lodi, «Local branching», *Mathematical Programming*, vol. 98, pp. 23-47, 2005.
- [132] O. Skovholt, «CO2 Transportation System», *Energy Convers Mgmt*, vol. 34, n° 19-11, pp. 1095-1103, 1993.
- [133] M. Norisor, A. Badea et C. Dinca, «Economic and Technical analysis of CO2 Transport Ways», *U.P.B.SCI.BULL*, vol. 74, pp. 127-138, 2012.
- [134] M. L. Perez, M. R. Susa, M. Pellerano et A. Delebarre, «Technico-Economic Evaluation of CO2 Transport in an Adsorbed Phase», *Low Carbon Economy*, vol. 3, pp. 21-33, 2012.
- [135] Argonne National Laboratory, «2014 Vehicle Technologies Market Report», 2014.
- [136] IPCC, «Special Report on Carbon dioxide Capture and Storage», [En ligne]. Available: [https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs\\_wholereport.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs_wholereport.pdf).
- [137] S. Martynov, H. Mahgerefteh et S. Brown, «CO2 Transportation for CCS», 2012.
- [138] Z. Zhang, G. Wang, P. Massarotto et V. Rudolph, «Optimization of pipeline transport for CO2 sequestration», *Energy Conversion and Management*, vol. 47, pp. 702-715, 2006.
- [139] M. K. Chandel, L. F. Pratson et E. Williams, «Potential economies of scale in CO2 transport through use of a truck pipeline», *Energy Conversion and Management*, vol. 51, pp. 2825-2834, 2010.
- [140] V. Vandeginste et K. Piessens, «Pipeline design for a least-cost router application for CO2 transport in the CO2 sequestration cycle», *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 2, pp. 571-581, 2008.
- [141] IEAGHG, «CO2 pipeline infrastructure», 2014.
- [142] IEA, «Building the cost curves for CO2 Storage: European Sector», 2005.
- [143] D. L. McCollum et J. M. Ogden, «Techno-economic models for carbon dioxide compression, transport, and storage & Correlations for estimating carbon dioxide density and viscosity», 2006.
- [144] Element Energy, «CO2 pipeline infrastructure», 2010.

- 
- [145] M. Finkenrath, «Cost and Performance of Carbon Dioxide Capture from Power Generation», 2011.
- [146] N. Perrin, R. Debettier, F. Lockwood, P. Court, J.-P. Tranier, C. Bourhy-Weber et M. Devaux, «Oxycombustion for carbon capture on coal power plants and industrial processes: advantages, innovative solutions and key projects», *Energy Procedia*, 2013.
- [147] J. Birat, F. Hanrot et G. Danloy, Écrivains, *CO2 mitigation technologies in the steel industry: a benchmarking study based on process calculations*. [Performance]. 2003.
- [148] A. Hasanbeigi, L. Price et M. Arens, «Emerging Energy-efficiency and Carbon Dioxide Emissions-reduction Technologies for the Iron and Steel Industry», 2013.
- [149] D. Leeson, J. Fairclough, C. Pétit et P. Fennell, «A systematic review of current technology and cost for industrial carbon capture», 2014.
- [150] D. Gielen, «CO2 removal in the iron and steel industry», *Energy Conversion and Management*, vol. 44, pp. 1027-1037, 2003.
- [151] D. E. Wiley, M. T. Hoa et A. Bustama, «Assessment of opportunities for CO2 capture at iron and steel mills: An Australian perspective», *Energy Procedia*, vol. 4, pp. 2654-2661, 2011.
- [152] A. Arasto, E. Tsupari, J. Karki, M. Sihvonen et J. Lilja, «Costs and potential of carbon capture and storage at an integrated steel mill», *Energy Procedia*, vol. 37, pp. 7117-7124, 2013.
- [153] E. Tsupari, J. Karki, A. Arasto et E. Pisila, «Post-combustion capture of CO2 at an integrated steel mill-Part II: Economic feasibility», *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 16, pp. 278-286, 2013.
- [154] I. Miracca, K. I. Asen, J. Assink, C. Coulter, L. Curran, C. Lowe, G. T. Moure et S. Schlasner, «The CO2 Capture Project (CCP): Results from Phase II (2004-2009)», *Energy Procedia*, vol. 1, n° 11, pp. 55-62, 2009.
- [155] J. V. Starelen, F. Geuwebroek, N. Goodchild, G. Protopapas et L. Mahony, «CO2 capture for refineries, a practical approach», *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 4, pp. 316-320, 2010.
- [156] D. Johansson, P.-A. Franck, K. Pettersson et T. Berntsson, «Comparative study of Fischer-Tropsch production and post-combustion CO2 capture at an oil refinery: Economic evaluation and GHG balances», *Energy*, vol. 59, pp. 387-401, 2013.

- 
- [157] E. Lemaire, P. A. Bouillon, A. Gomez, J. Kittel, S. Gonzalez, P. L. Carrette, B. Delfort, P. Mougin, P. Alix et L. Normand, «New IFP optimized first generation process for post-combustion carbon capture:HiCapt+», *Energy procedia*, vol. 4, pp. 1361-1368, 2011.
- [158] J. Davison, Écrivain, *CCS in the Cement Industry*. [Performance]. 2014.
- [159] Global CCS Institute, «Deployment of CCS in the cement industry», 2013.
- [160] J. Bisschop et A. Meeraus, *On the development of a General Algebraic Modeling System in a strategic planning environment.*, Springer Berlin Heidelberg, 1982.
- [161] M. J. Eckelman et M. R. Chertow, «Quantifying Life Cycle Environmental Benefits from the Reuse of Industrial Materials in Pennsylvania», *Environ. Sci. Technol*, pp. 2550-2556, 2009.
- [162] E. Marvin, «Gypsum Wallboard Recycling and Reuse Opportunities in the State of Vermont», 2000.
- [163] A. Founie, «Gypsum», chez *U.S. GEOLOGICAL SURVEY MINERALS YEARBOOK*, USGS, 2003.
- [164] Kwinana Industries Council, «Industrial reuse of by-product-reuse of gypsum from CSBP to Alcoa», [En ligne]. Available: [www.kic.org.au](http://www.kic.org.au).
- [165] The Aberdeen Group, «Fly ash», [En ligne]. Available: [http://www.concreteconstruction.net/Images/Fly%20Ash\\_tcm45-346438.pdf](http://www.concreteconstruction.net/Images/Fly%20Ash_tcm45-346438.pdf).
- [166] D. Langer, «How the economy benefits from coal ash utilization», [En ligne]. Available: [http://www.coal-ash.co.il/present09/Langer\\_EconomicCoalAshUtilizationAssessment\\_IntroSession.pdf](http://www.coal-ash.co.il/present09/Langer_EconomicCoalAshUtilizationAssessment_IntroSession.pdf).
- [167] M. L. D. Jayaranjan, E. D. Van Hullebusch et A. P. Annachhatre, «Reuse options for coal fired power plant bottom ash and fly ash», *Rev Environ Sci Biotechnol*, vol. 13, n° 14, pp. 467-486, 2014.
- [168] D. Kjersgaard, B. N. Jacobsen, K. Rindel, L. Andreasen, F. Larsen, P. Nyegaard, C. Pade et J. Bodker, «The reuse of bio ash for the production of concrete.A Danish case study.», IWA Specialist Conference on Wastewater Biosolids , 2007.
- [169] A. Hospido, M. Carballa, M. Moreira, F. Omil, J. M. Lema et G. Feijoo, «Environmental assessment of anaerobically digested sludge reuse in agriculture: potential impacts of

---

emerging micropollutants», *Water research*, 2010.

- [170] S. R. Smith, «Management, use, and disposal of sewage sludge», *Environment international*, vol. 35, n° 11, pp. 142-156, 2007.
- [171] T. Taruya, O. Okuno et K. Kanaya, «Reuse of sewage sludge as raw material of portland cement in japan», *Water Science & Technology*, vol. 46, n° 110, pp. 255-258, 2002.
- [172] D. Fytili et A. Zabaniotou, «Utilisation of sewage sludge in EU application of old and new methods. A review.», *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 12, n° 11, pp. 116-140, 2008.
- [173] L. Recchia, E. Cini, L. Faggioli, S. Corsi et F. Piragino, «Evaluation of the reuse of biomass produced by riparian vegetation management», 16th European biomass conference and exhibition from research to industry and markets, Feria Valencia, 2008.
- [174] N. Rashid, M. S. U. Rehman et J. I. Han, «Recycling and reuse of spent microalgal biomass for sustainable biofuels», *Biochemical engineering journal*, vol. 75, pp. 101-107, 2013.
- [175] G. Berndes, M. Hoogwijk et R. Van Den Broek, «The contribution of biomass in the future global energy supply: a review of 17 studies», *Biomass and bioenergy*, vol. 25, n° 11, pp. 1-28, 2003.
- [176] ANEA & IVAMER, «Etat des lieux des déchets et sous-produits organiques issus de l'industrie agro-alimentaire bas-normande», [En ligne]. Available: <http://www.anea-normandie.com/wp-content/uploads/Les-d%C3%A9chets-de-IIAA-et-leur-gestion-en-BN.pdf>.

---

## Figures

Figure 1. Parc éco-industriel de Kalundborg en 2002 [12]. .....	20
Figure 2. Parc éco-industriel de Kwinana, Australie en 2007 [16]. .....	22
Figure 3. Parc éco-industriel de Kawasaki, Japon en 2009 [17]. .....	24
Figure 4. Parc éco-industriel de Tianji, Chine, en 2007 [19]. .....	26
Figure 5. Parc éco-industriel de Guangxi, Chine, en 2004 [21]. .....	27
Figure 6. Parc éco-industriel de Barceloneta, Porto Rico en 2008 [25]. .....	28
Figure 7. Parc éco-industriel de Guayama, Porto Rico en 2008 [25]. .....	28
Figure 8. Illustration de Type 1 : un échange de déchet entre l'industrie 1 et l'industrie 2 doit être réalisé par un troisième acteur l'industrie 3. ....	30
Figure 9. Illustration de Type 2: Les échanges se limite principalement dans l'intérieur de l'industrie 1 et probablement intègrent ces activités à proximité l'industrie 2 et l'industrie 3. ....	31
Figure 10. Illustration de Type 3: les échanges statiques entre les industries différentes dans un définie éco-industrielle parc, Eco-Parc 1, et probablement les échanges entre les industries intérieur de ce parc et les industries extérieurs, comme le flèche pointillé entre l'industrie intérieur 5 et l'industrie extérieur 6. ....	31
Figure 11. Un exemple de carte de base d'IEPT pour un petit réseau d'installations, dont une usine de traitement de l'eau (CAP), une usine de traitement des eaux usées (STEP) et trois usines de fabrication (CHM, GAZ et CYC). [52]. .....	36
Figure 12. Concept de IUWAWM [49]. .....	37
Figure 13. Modèle d'entité de relation de l'IUWAWM [49]. .....	38
Figure 14. . Illustration de projet CSC à Lacq, France.....	43
Figure 15. Vue d'ensemble des processus et des systèmes de captage de CO <sub>2</sub> [61]. .....	44
Figure 16. Le coût de transport de CO <sub>2</sub> à 250 km [63]. .....	45
Figure 17. Un système de micro-algues conceptuel pour la production combinée des biocarburants, CO <sub>2</sub> bio-atténuation, et N / P élimination des eaux usées [75]. .....	47
Figure 18. La production d'énergie via la conversion de la biomasse de micro-algues utilisant biochimique, thermochimique, chimique, et les processus de combustion directe [75].	47
Figure 19. (À gauche) concept de processus de carbonatation directe; (à droite) indirecte concept de processus de carbonatation (source : [80]). .....	49
Figure 20. Simplifié carbonatation aqueuse directe [80]. .....	50
Figure 21. Diagramme de flux de processus de production de CaCO <sub>3</sub> de CO <sub>2</sub> et de ciment déchets. Le CaCO <sub>3</sub> produit peut être vendu soit en tant que réactif de haute pureté ou utilisé comme agent de désulfuration [89]. .....	51
Figure 22. Schéma d'un procédé Bayer, dont le dioxyde de carbone pourrait être une alternative d'amendements de neutralisation pré-élimination [98]. .....	53
Figure 23. Vue schématique d'une polymérisation catalytique basé sur la technologie de dioxyde de carbone, dans lequel le catalyseur et les monomères peuvent être recyclés dans un processus en boucle fermée [106]. .....	55
Figure 24. Diagrammes de blocs de Carbone Sence Solutions Inc du processus de durcissement de béton de CO <sub>2</sub> accélérée (en haut, éclos) et le processus de durcissement	

à la vapeur conventionnelle (en bas, foncé). Les deux processus partagent le processus de production de béton commune (au milieu, pas de remplissage) [108].	56
Figure 25. Utilisation de la chaleur des déchets et de l'électricité renouvelable pour produire du méthanol à partir de combustion de dioxyde de carbone de gaz [112].	57
Figure 26. Schéma de principe de l'ERC de la technologie (électro-réduction de dioxyde de carbone) pour l'acide formique. [113]	58
Figure 27. Représentation schématique de la synthèse de l'urée [116].	59
Figure 28. Illustration des pipelines onshores en tailles standards différents [130].	73
Figure 29. Illustration d'un camion-citerne (source : <a href="http://www.group-maisonneuve.com">www.group-maisonneuve.com</a> ).	76
Figure 30. Pipeline utilisé de projet CSC à Lacq, France. (Source : <a href="http://www.total.com">www.total.com</a> )	77
Figure 31. Principe d'oxycombustion (Air Liquide) sur les chaudières à charbon [144].	82
Figure 32. [154] Le captage système du CO <sub>2</sub> en postcombustion.	84
Figure 33. Illustration de l'industrie 'sourceCO <sub>2</sub> '.	86
Figure 34. Illustration de l'industrie 'client CO <sub>2</sub> '.	86
Figure 35. Etapes de simulations numériques.	96
Figure 36. Le flux d'échange du type ki de l'industrie i pour remplacer le type j de l'industrie j.	108
Figure 37. Le coût de transport à charger et le coût de traitement possibles du sous-produit pour la réalisation du flux d'échange entre les deux industries i et j.	109
Figure 38. Illustration de l'analyse des flux de l'industrie i.	110
Figure 39. Les possibilités du traitement du sous-produit de l'industrie i.	111
Figure 40. Un exemple schématique des sous-produits de la production d'une industrie i.	111
Figure 41. Illustration de la contrainte de bilan massique d'un flux sortant de l'industrie i durant une période t.	114
Figure 42. Illustration de contraintes d'un processus de traitement p de l'industrie i.	115
Figure 43. Les possibilités d'acquis de matériel premier de l'industrie j.	117
Figure 44. Un exemple schématique de sous-produits d'entrée de l'industrie j.	118
Figure 45. Etapes de simulations numériques.	127
Figure 46. Un flux d'échange du type ki de l'industrie i pour remplacer le type kj de l'industrie j.	146
Figure 47. Illustration de l'analyse des flux de l'industrie i.	147
Figure 48. Les quatre parties de la composition de l'industrie i.	148
Figure 49. Les possibilités de traitement du sous-produit du type ki de l'industrie i.	148
Figure 50. Les possibilités d'acquis du matériel premier de l'industrie j.	149
Figure 51. Illustration de la contrainte de bilan massique d'un flux sortant du type ki de l'industrie i durant une période t.	151
Figure 52. Illustration de la contrainte de bilan massique d'un flux entrant du type ki de l'industrie i durant une période t.	152
Figure 53. Illustration de l'entrée du processus de traitement pe de l'industrie i.	155
Figure 54. Illustration de la sortie du processus de traitement pe de l'industrie i.	155
Figure 55. Illustration de l'entrée du processus de traitement ps de l'industrie i.	159
Figure 56. Illustration de la sortie du processus de traitement ps de l'industrie i.	160
Figure 57. Etapes de simulations numériques.	172



---

## Tableaux

Tableau 1. Taxonomie d'outils informatiques pour parcs éco-industriels. ....	40
Tableau 2. Coût de Captage CO <sub>2</sub> dans les centrales électriques [61] .....	44
Tableau 3. Coût de Captage CO <sub>2</sub> dans les industries de type traitement de gaz naturel et de type raffinerie [70]. ....	45
Tableau 4. Coûts liés de technologie CCU-La culture d'algues.....	48
Tableau 5. Coûts liés de technologie CCU-La minéralisation de carbonate .....	52
Tableau 6. Coûts liés de technologie CCU-La bauxite résidu carbonatation .....	54
Tableau 7. Coûts liés de technologie CCU-La transformation des polymères .....	55
Tableau 8. Coûts liés de technologie CCU-Le durcissement de béton.....	57
Tableau 9. Coûts liés de technologie CCU-La production de carburant liquide .....	58
Tableau 10. Coûts liés de technologie CCU-Le rendement de l'urée stimulé [80]. ....	60
Tableau 11. Résumé d'utilisations différentes de la technologie CCU [80] [68] [81] .....	60
Tableau 12. Le transport du CO <sub>2</sub> en camion pour une distance entre 150km et 300km. (Data source: [134]). ....	74
Tableau 13. Coût carburant consommé et coût fixe de transport du CO <sub>2</sub> en camion pour une distance entre 150km et 300km.....	74
Tableau 14. Les coefficients déterminés pour le coût fixe de transport du CO <sub>2</sub> . ....	75
Tableau 15. Le carburant consommé par heure sans charge ( <i>cphsc</i> ) selon le type de camions. (Data source : [135]) .....	75
Tableau 16. Projets de transport du CO <sub>2</sub> en pipeline (data source : [136] [137]) .....	77
Tableau 17. Paramètres de transport du CO <sub>2</sub> en camion. ....	80
Tableau 18. Paramètres de transport du CO <sub>2</sub> en pipeline. ....	80
Tableau 19. Coût du captage du CO <sub>2</sub> dans les centrales électriques [61].....	81
Tableau 20. Les coûts de captage du CO <sub>2</sub> en industrie du fer et d'acier [149].....	83
Tableau 21. Coût du captage du CO <sub>2</sub> en raffineries [149] [157]. ....	84
Tableau 22. Coût du captage du CO <sub>2</sub> dans les différentes cimenteries [149].....	85
Tableau 23. Paramètres de l'industrie i du type source CO <sub>2</sub> . ....	87
Tableau 24. Variables de l'industrie i du type source CO <sub>2</sub> . ....	87
Tableau 25. Paramètres de l'industrie j du type client CO <sub>2</sub> .....	88
Tableau 26. Variable de l'industrie j du type client CO <sub>2</sub> . ....	88
Tableau 27. Variable de transport du CO <sub>2</sub> par un transporteur routier. ....	89
Tableau 28. Résumé des indices et ensembles. ....	91
Tableau 29. Résumé des paramètres. ....	92
Tableau 30. Résumé des variables.....	93
Tableau 31. Industries du type Source CO <sub>2</sub> .....	97
Tableau 32. Industries du type ClientCO <sub>2</sub> .....	97
Tableau 33. Fiche de données « IndustrieSourceCO <sub>2</sub> ». ....	97
Tableau 34. Fiche de données « IndustrieClientCO <sub>2</sub> Fix ». ....	98
Tableau 35. Fiche de données « IndustrieClientCO <sub>2</sub> NonFix ». ....	98
Tableau 36. Fiche de données « Coût Production ». ....	98
Tableau 37. Fiche de données « TauxCO <sub>2</sub> ». ....	99
Tableau 38. Fiche de données « TechnologieFixE ». ....	99

Tableau 39. Fiche de données « TechnologieFixS ».	100
Tableau 40. Fiche de données « TechnologieNonFixE ».	100
Tableau 41. Fiche de données « TechnologieNonFixS ».	100
Tableau 42. Fiche de données « InfoSourceCO <sub>2</sub> ».	100
Tableau 43. Fiche de données « DataCamionTransport ».	100
Tableau 44. Temps de calcul.	101
Tableau 45. Statistique du modèle.	101
Tableau 46. Valeur des variables d'échange $X_{ji}^k$ .	101
Tableau 47. Valeur de $XE_j^k$ .	102
Tableau 48. Niveau de « RelationClient-Source », rclient.	103
Tableau 49. Niveau de « Relation Source-Client», rsource (1).	104
Tableau 50. Niveau de « Relation Source-Client», rsource (2).	104
Tableau 51. Un résumé de différences entre Modèle I et Modèle II.	107
Tableau 52. Les exemples de la substitution actuelle des matières secondaires non dangereux pour les matériaux vierges en Pennsylvanie en 2004 [161].	108
Tableau 53. Ensembles primaires du modèle.	110
Tableau 54. Variables des flux sortants de l'industrie i.	112
Tableau 55. Paramètres des flux sortants de l'industrie i.	113
Tableau 56. Ensembles du bilan massique de la modélisation des flux sortants d'une industrie i.	114
Tableau 57. Ensembles de la modélisation du processus de traitement.	116
Tableau 58. Variables des flux entrants de l'industrie j.	117
Tableau 59. Paramètres des flux entrants de l'industrie j.	118
Tableau 60. Ensembles du bilan massique du flux entrant d'une industrie.	119
Tableau 61. Variables du stockage de l'industrie i.	119
Tableau 62. Paramètres du stockage de l'industrie i.	120
Tableau 63. Variables du coût de transport.	120
Tableau 64. Paramètres du coût de transport.	121
Tableau 65. Résumé des ensembles du modèle.	123
Tableau 66. Résumé des variables du modèle.	124
Tableau 67. Résumé des paramètres du modèle.	125
Tableau 68. Fiche de données « Location ».	127
Tableau 69. Fiche de données « I-BO ».	128
Tableau 70. Fiche de données « I-BI ».	128
Tableau 71. Fiche de données « I-P-BOP-BSI ».	129
Tableau 72. Fiche de données « KIKJ-Match ».	129
Tableau 73. Fiche de données de la capacité du stockage et le support financière de l'industrie i.	129
Tableau 74. Fiche de données « Quantité de production de sous-produit par période ».	130
Tableau 75. Fiche de données « Capacité de traitement de procédé par période ».	130
Tableau 76. Fiche de données de coût Transport unitaire par période.	131
Tableau 77. Fiche de données de coût de traitement directement par période.	131

---

Tableau 78. Fiche de données de prix d'achat d'un matériel venant de l'extérieur du PEI par période.....	131
Tableau 79. Fiche de données de prix de vente intérieur du PEI par période. ....	132
Tableau 80. Fiche de données « Quantité de demande par période ».....	133
Tableau 81. Fiche de données de coût du stockage unitaire par période.....	133
Tableau 82. Fiche de données de coût d'amortissement unitaire de procédé par période.....	135
Tableau 83. Fiche de données de prix de vente unitaire à l'extérieur du PEI par période.....	135
Tableau 84. Temps de calcul. ....	135
Tableau 85. Statistique de modèle.....	136
Tableau 86. Variable XS (les variables XS sont nulles par défaut). ....	136
Tableau 87. Variable XTT (les variables XTT sont 0 par défaut.) ....	137
Tableau 88. Temps de calcul. ....	138
Tableau 89. Statistique de modèle.....	138
Tableau 90. Variable XS (les variables XS sont 0 par défaut).....	138
Tableau 91. Variable XTT (les variables XTT sont 0 par défaut.) ....	139
Tableau 92. Niveau de « RelationClient-Source », relie. ....	141
Tableau 93. Un résumé de différences entre Modèle II et Modèle III.....	145
Tableau 94. Ensemble primaire du modèle. ....	148
Tableau 95. Variables de la partie « Industrie i ». ....	149
Tableau 96. Paramètres des flux sortants de l'industrie i. ....	150
Tableau 97. Ensembles de bilan massique de la modélisation de la partie « Industrie i ». ...	153
Tableau 98. Variables de la partie « PE ». ....	156
Tableau 99. Ensembles de la modélisation de la partie « PE ». ....	156
Tableau 100. Paramètres de contrôle du procédé pe de l'industrie i. ....	157
Tableau 101. Variable de contrôle du procédé pe de l'industrie i.....	157
Tableau 102. Variables de la partie « PS ». ....	161
Tableau 103. Ensembles de la modélisation de la partie « PS ».....	161
Tableau 104. Paramètres de contrôle du procédé ps de l'industrie i. ....	162
Tableau 105. Variable de contrôle du procédé ps de l'industrie i.....	162
Tableau 106. Variables de la modélisation du coût de transport. ....	164
Tableau 107. Paramètres de la modélisation du coût de transport. ....	164
Tableau 108. Variable du stockage de l'industrie i.....	165
Tableau 109. Paramètres du stockage de l'industrie i. ....	165
Tableau 110. Résumé des ensembles du modèle.....	169
Tableau 111. Résumé des variables du modèle. ....	170
Tableau 112. Résumé des paramètres du modèle.....	171
Tableau 113. Fiche de données « Location ». ....	173
Tableau 114. Fiche de données « BO ». ....	173
Tableau 115. Fiche de données « BI ». ....	173
Tableau 116. Fiche de données « PE ». ....	173
Tableau 117. Fiche de données « PS ». ....	173
Tableau 118. Fiche de données « PEI ». ....	174
Tableau 119. Fiche de données « PEO ». ....	174
Tableau 120. Fiche de données « PSI ». ....	174

---

---

Tableau 121. Fiche de données « PSO ».....	174
Tableau 122. Fiche de données « Type Remplace ».....	174
Tableau 123. Fiche de données « Quantité de Production».....	175
Tableau 124. Fiche de données « Quantité de Demande».....	175
Tableau 125. Fiche de données « Capacité de traitement d'un procédé».....	175
Tableau 126. Fiche de données « Capacité du stockage».....	175
Tableau 127. Fiche de données « PU».....	176
Tableau 128. Fiche de données « PUP».....	176
Tableau 129. Fiche de données « PP».....	176
Tableau 130. Fiche de données « PPP».....	177
Tableau 131. Fiche de données « PA».....	177
Tableau 132. Fiche de données « PAP».....	177
Tableau 133. Fiche de données « Coût unitaire de production CPE et CPS».....	177
Tableau 134. Fiche de données « PI».....	178
Tableau 135. Fiche de données « Seuil».....	178
Tableau 136. Temps de calcul.....	179
Tableau 137. Statistique de modèle.....	179
Tableau 138. Valeur de variable $XTT(i,j,ki,kj,t)$ (La quantité de j de type kj à i pour remplacer le type ki pendant la période t).....	180
Tableau 139. Valeur de variable $XIS(i,ps,kps,k,t)$ .....	180
Tableau 140. Temps de calcul.....	181
Tableau 141. Statistique de modèle.....	181
Tableau 142. Valeurs de variable $XTT(i,j,ki,kj,t)$ .....	181
Tableau 143. Niveau de « RelationClient-Source », rclient.....	183
Tableau 144. Taxonomie d'outils informatiques pour parcs éco-industriels.....	186
Tableau 145. Résumé de trois modèles.....	187