HAL
open science

# Evaluation des impacts simultanes de la localisation, de l'efficacite et du type de produits fabriques sur les performances environnementales et financieres d'une chaine logistique

Anicia Lagier-Jaegler

## To cite this version:

Anicia Lagier-Jaegler. Evaluation des impacts simultanes de la localisation, de l'efficacite et du type de produits fabriques sur les performances environnementales et financieres d'une chaine logistique. Autre. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2011. Français. NNT : 2011EMSE0620 . tel-00844739

**HAL Id: tel-00844739**

**https://theses.hal.science/tel-00844739**

Submitted on 15 Jul 2013

**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.

NNT : 2011- EMSE- 0620

# THÈSE

présentée par

Anicia LAGIER-JAEGLER

pour obtenir le grade de
Docteur de l'École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne

Spécialité : Génie Industriel et Sciences de Gestion

# EVALUATION DES IMPACTS SIMULTANES DE LA LOCALISATION, DE L'EFFICACITE ET DU TYPE DE PRODUITS FABRIQUES SUR LES PERFORMANCES ENVIRONNEMENTALES ET FINANCIERES D'UNE CHAINE LOGISTIQUE

soutenue à Saint-Etienne, le 29 septembre 2011

Membres du jury

| | | |
|---|---|---|
| Président : | Vincent Giard | Professeur, Université Dauphine, Paris |
| Rapporteurs : | Valérie BOTTA-GENOULAZ | Professeur, INSA, Lyon |
| | Claude PELLEGRIN | Professeur, Université Lumière, Lyon 2 |
| Examinateur(s) : | Marie-Agnès GIRARD | Maître-assistant, Ecole des Mines, Saint-Etienne |
| | Caroline THIERRY | Professeur, Université de Toulouse, Toulouse |
| Directeur(s) de thèse : | Patrick BURLAT | Professeur, Ecole des Mines, Saint-Etienne |
| Invité(s) éventuel(s): | Natacha GONDRAN | Maître-assistant, Ecole des Mines, Saint-Etienne |

| **Spécialités doctorales :** | **Responsables :** |
|---|---|
| SCIENCES ET GENIE DES MATERIAUX | J. DRIVER Directeur de recherche – Centre SMS |
| MECANIQUE ET INGENIERIE | A. VAUTRIN Professeur – Centre SMS |
| GENIE DES PROCEDES | G. THOMAS Professeur – Centre SPIN |
| SCIENCES DE LA TERRE | B. GUY Maître de recherche – Centre SPIN |
| SCIENCES ET GENIE DE L'ENVIRONNEMENT | J. BOURGOIS Professeur – Centre SITE |
| MATHEMATIQUES APPLIQUEES | E. TOUBOUL Ingénieur – Centre G2I |
| INFORMATIQUE | O. BOISSIER Professeur – Centre G2I |
| IMAGE, VISION, SIGNAL | JC. PINOLI Professeur – Centre CIS |
| GENIE INDUSTRIEL | P. BURLAT Professeur – Centre G2I |
| MICROELECTRONIQUE | Ph. COLLOT Professeur – Centre CMP |

**Enseignants-chercheurs et chercheurs autorisés à diriger des thèses de doctorat** (titulaires d'un doctorat d'État ou d'une HDR)

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| AVRIL | Stéphane | MA | Mécanique & Ingénierie | CIS |
| BATTON-HUBERT | Mireille | MA | Sciences & Génie de l'Environnement | SITE |
| BENABEN | Patrick | PR 1 | Sciences & Génie des Matériaux | CMP |
| BERNACHE-ASSOLLANT | Didier | PR 0 | Génie des Procédés | CIS |
| BIGOT | Jean-Pierre | MR | Génie des Procédés | SPIN |
| BILAL | Essaïd | DR | Sciences de la Terre | SPIN |
| BOISSIER | Olivier | PR 1 | Informatique | G2I |
| BORBELY | Andras | MR | Sciences et Génie des Matériaux | SMS |
| BOUCHER | Xavier | MA | Génie Industriel | G2I |
| BOUDAREL | Marie-Reine | PR 2 | Génie Industriel | DF |
| BOURGOIS | Jacques | PR 0 | Sciences & Génie de l'Environnement | SITE |
| BRODHAG | Christian | DR | Sciences & Génie de l'Environnement | SITE |
| BURLAT | Patrick | PR 2 | Génie industriel | G2I |
| COLLOT | Philippe | PR 1 | Microélectronique | CMP |
| COURNIL | Michel | PR 0 | Génie des Procédés | SPIN |
| DAUZERE-PERES | Stéphane | PR 1 | Génie industriel | CMP |
| DARRIEULAT | Michel | IGM | Sciences & Génie des Matériaux | SMS |
| DECHOMETS | Roland | PR 1 | Sciences & Génie de l'Environnement | SITE |
| DESRAYAUD | Christophe | MA | Mécanique & Ingénierie | SMS |
| DELAFOSSE | David | PR 1 | Sciences & Génie des Matériaux | SMS |
| DOLGUI | Alexandre | PR 1 | Génie Industriel | G2I |
| DRAPIER | Sylvain | PR 2 | Mécanique & Ingénierie | SMS |
| DRIVER | Julian | DR 0 | Sciences & Génie des Matériaux | SMS |
| FEILLET | Dominique | PR 2 | Génie Industriel | CMP |
| FOREST | Bernard | PR 1 | Sciences & Génie des Matériaux | CIS |
| FORMISYN | Pascal | PR 1 | Sciences & Génie de l'Environnement | SITE |
| FRACZKIEWICZ | Anna | DR | Sciences & Génie des Matériaux | SMS |
| GARCIA | Daniel | MR | Génie des Procédés | SPIN |
| GIRARDOT | Jean-Jacques | MR | Informatique | G2I |
| GOEURIOT | Dominique | MR | Sciences & Génie des Matériaux | SMS |
| GRAILLOT | Didier | DR | Sciences & Génie de l'Environnement | SITE |
| GROSSEAU | Philippe | MR | Génie des Procédés | SPIN |
| GRUY | Frédéric | MR | Génie des Procédés | SPIN |
| GUY | Bernard | MR | Sciences de la Terre | SPIN |
| GUYONNET | René | DR | Génie des Procédés | SPIN |
| HERRI | Jean-Michel | PR 2 | Génie des Procédés | SPIN |
| INAL | Karim | PR 2 | Microélectronique | CMP |
| KLÖCKER | Helmut | DR | Sciences & Génie des Matériaux | SMS |
| LAFOREST | Valérie | CR | Sciences & Génie de l'Environnement | SITE |
| LERICHE | Rodolphe | CR CNRS | Mécanique et Ingénierie | SMS |
| LI | Jean-Michel | EC (CCI MP) | Microélectronique | CMP |
| MALLIARAS | George Grégory | PR 1 | Microélectronique | CMP |
| MOLIMARD | Jérôme | MA | Mécanique et Ingénierie | SMS |
| MONTHEILLET | Frank | DR 1 CNRS | Sciences & Génie des Matériaux | SMS |
| PERIER-CAMBY | Laurent | PR 2 | Génie des Procédés | SPIN |
| PIJOLAT | Christophe | PR 1 | Génie des Procédés | SPIN |
| PIJOLAT | Michèle | PR 1 | Génie des Procédés | SPIN |
| PINOLI | Jean-Charles | PR 0 | Image, Vision, Signal | CIS |
| STOLARZ | Jacques | CR | Sciences & Génie des Matériaux | SMS |
| SZAFNICKI | Konrad | MR | Sciences & Génie de l'Environnement | SITE |
| THOMAS | Gérard | PR 0 | Génie des Procédés | SPIN |
| TRIA | Assia | | Microélectronique | CMP |
| VALDIVIESO | François | MA | Sciences & Génie des Matériaux | SMS |
| VAUTRIN | Alain | PR 0 | Mécanique & Ingénierie | SMS |
| VIRICELLE | Jean-Paul | MR | Génie des procédés | SPIN |
| WOLSKI | Krzysztof | DR | Sciences & Génie des Matériaux | SMS |
| XIE | Xiaolan | PR 1 | Génie industriel | CIS |

**Glossaire :**

| | |
|---|---|
| PR 0 | Professeur classe exceptionnelle |
| PR 1 | Professeur 1ère classe |
| PR 2 | Professeur 2ème classe |
| MA(MDC) | Maître assistant |
| DR | Directeur de recherche |
| Ing. | Ingénieur |
| MR(DR2) | Maître de recherche |
| CR | Chargé de recherche |
| EC | Enseignant-chercheur |
| IGM | Ingénieur général des mines |

**Centres :**

| | |
|---|---|
| SMS | Sciences des Matériaux et des Structures |
| SPIN | Sciences des Processus Industriels et Naturels |
| SITE | Sciences Information et Technologies pour l'Environnement |
| G2I | Génie Industriel et Informatique |
| CMP | Centre de Microélectronique de Provence |
| CIS | Centre Ingénierie et Santé |

Dernière mise à jour le : 13 septembre 2010

# REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier

- en premier lieu Patrick Burlat, mon directeur de thèse, pour son soutien et son précieux suivi,

- l'équipe du laboratoire LSTI de l'ENSMSE pour leurs conseils,

- tous les membres du jury,

- l'IDRAC et Jean-Luc Zécri pour toute l'aide qu'ils m'ont apportée durant ces trois années,

- l'entreprise Carrier et notamment Fabienne Coruble pour les données industrielles.

A mon A et mes trois a,

# Sommaire

**Chapitre I Introduction ..... 10**
I. 1. Contexte et problématique ..... 10
I. 2. Objectifs ..... 11
I. 3. Méthodologie de travail ..... 12
I. 4. Plan ..... 13
Partie 1 : Etat de l'art ..... 15
**Chapitre I . Chaînes logistiques ..... 16**
I. 1. Définitions ..... 17
I.1.1 Définition de la logistique ..... 17
I.1.2 Définition d'une chaîne logistique ..... 19
I.1.3 Discussion ..... 21
I. 2. Caractérisation de la chaîne logistique ..... 22
I.2.1 Caractérisation structurelle ..... 22
I.2.2 Caractérisation organisationnelle ..... 22
I.2.3 Caractérisation fonctionnelle ..... 23
I.2.4 Discussion ..... 28
I. 3. Gestion de la chaîne logistique ..... 28
I.3.1 Historique ..... 28
I.3.2 Contexte ..... 29
I.3.3 Définition ..... 29
I.3.4 Principes de base ..... 32
I.3.5 Gestion des stocks ..... 33
I.3.6 Discussion ..... 34
I. 4. Performance de la chaîne logistique ..... 34
I.4.1 Définition ..... 34
I.4.2 Indicateurs de la performance ..... 35
I.4.3 Discussion ..... 39
I. 5. Conclusion ..... 39
**Chapitre II Contexte carbone ..... 40**
II. 1. Changements ..... 41
II.1.1 Changement environnemental ..... 41
II.1.2 Changement économique ..... 43
II.1.3 Changement humain ..... 43

II. 2. Cycle de conférences ..... 44
II.2.1 . Pré Stockholm ..... 44
II.2.2 . Stockholm-World Commission on Environment and Development (WCED) 44
II.2.3 . Post WCED ..... 45
II. 3. Marché carbone européen ..... 47
II.3.1 Emissions d'équivalent $CO_2$ en Europe ..... 47
II.3.2 Taxe ou système d'échanges ? ..... 48
II.3.3 Marché européen ..... 50
II. 4. Autres implications en France ..... 53
II.4.1 Etiquetage carbone ..... 53
II.4.2 Bilan Carbone ® ..... 54
II.4.3 Images des entreprises ..... 54
II. 5. Conclusion ..... 54
**Chapitre III Chaîne logistique verte ..... 55**
III. 1. Chaîne logistique verte ..... 56
III.1.1 Contexte ..... 56
III.1.2 Définition ..... 56
III. 2. Gestion de la chaîne logistique verte ..... 58
III.2.1 Définition ..... 58
III.2.2 Historique des travaux de recherches ..... 58
III. 3. Performance ..... 59
III.3.1 Performance environnementale ..... 59
III.3.2 Lien entre performances financière et environnementale ..... 60
III.3.3 Lien entre émissions de carbone et performance financière ..... 61
III.3.4 Indicateurs ..... 61
III.3.5 Discussion ..... 62
III. 4. Etude des émissions de carbone le long d'une chaîne logistique ..... 63
III. 5. Conclusion ..... 64
Partie 2 : Modélisation d'une chaîne logistique verte ..... 67
**Chapitre I Méthodologie de recherche ..... 68**
I. 1. Introduction ..... 69
I. 2. Démarche ..... 69
I. 3. Modèle logistique ..... 71
I.3.1 Chaîne logistique ..... 71
I.3.2 Entreprise ..... 71
I.3.3 Transport ..... 71
I.3.4 Flux de produits ..... 72

I. 4. Structure du modèle de simulation ..... 72
I. 5. Règles de gestion ..... 75
I.5.1 Règles d'approvisionnements et de livraison ..... 75
I.5.2 Règles de gestion des stocks ..... 76
I. 6. Paramètres ..... 78
I.6.1 Paramètres des entreprises ..... 78
I.6.2 Paramètres de transport ..... 81
I.6.3 Paramètres des produits ..... 81
I.6.4 Facteurs d'émissions d'équivalent de dioxyde de carbone ..... 85
**Chapitre II Calibrage du modèle ..... 86**
II. 1. Calibrage de l'efficacité des entreprises ..... 87
II. 2. Calibrage des durées de transport ..... 88
II. 3. Nombre et temps des réplications ..... 93
Partie 3 : Résultats et analyse des résultats ..... 96
**Chapitre I Plan de simulation ..... 97**
I. 1. Nombre de simulations ..... 98
I. 2. Plan de simulation ..... 99
I.2.1 Présentation des 2560 simulations ..... 99
I.2.2 Plan d'expériences ..... 101
**Chapitre II Les configurations homogènes ..... 102**
II. 1. Efficacité homogène, une seule localisation, quatre produits ..... 103
II.1.1 Analyse de la variance ..... 105
II. 2. Efficacité homogène, localisation lll-rrr, quatre produits ..... 105
II. 3. Efficacité homogène, localisation homogène, quatre produits ..... 109
**Chapitre III les configurations a localisation dégradée ..... 113**
III. 1. Configurations AAA, un produit, localisation dégradée ..... 114
III. 2. Configurations AAA, 4 produits, localisation dégradée ..... 117
III. 3. Configurations à efficacité homogène, quatre produits, localisation dégradée ..... 119
**Chapitre IV Configurations à efficacité dégradée ..... 123**
IV. 1. 8 configurations lll, produit 1 à efficacité dégradée ..... 124
IV. 2. 32 configurations lll, 4 produits, à efficacité dégradée ..... 125
IV. 3. 128 configurations à localisations homogènes, 4 produits et à efficacité dégradée ..... 127
IV.3.1 Analyse de la variance sur l'efficience ..... 129
**Chapitre V Autres configurations ..... 130**
V. 1. 64 configurations AAA, produit 1, à localisation quelconque ..... 131
V. 2. 128 configurations à efficacité homogène, produit 1 et à localisation quelconque ..... 133

V. 3. 512 configurations à efficacité homogène, 4 produits et à localisation quelconque ..... 135
V. 4. Bilan des conclusions ..... 136
**Chapitre VI Confirmation de la prédominance de certains paramètres ..... 137**
VI. 1. Efficacité, localisation, type de produits ..... 138
VI. 2. Détails de la localisation globale ..... 140
**Chapitre VII Conclusion et perspectives ..... 145**
VII. 1. Apports ..... 145
VII. 2. Conclusions ..... 146
VII.2.1 Poids des différentes données d'entrée ..... 146
VII.2.2 Type de produits ..... 146
VII.2.3 Localisation ..... 146
VII.2.4 Efficacité ..... 147
VII. 3. Perspectives ..... 147
VII.3.1 A court terme ..... 147
VII.3.2 A long terme ..... 148
Bibliographie ..... 149
Annexes ..... 160
**Chapitre I Compléments ..... 161**
I. 1. Définition du stock ..... 161
I. 2. Réapprovisionnement ..... 161
**Chapitre II Résultats des analyses statistiques ..... 162**
II. 1. Détails de la classification hiérarchique des 512 configurations ..... 162
II. 2. Analyse de la variance sur Efficacité/localisation/type de produits ..... 167
II. 3. Analyse de la variance localisation 1/3/5 ..... 168
**Chapitre III Articles publiés ..... 170**
III. 1. Listes ..... 170
III.1.1 Congrès internationaux ..... 170
III.1.2 Congrès nationaux ..... 170
III.1.3 Revues internationales ..... 170
III. 2. Articles ..... 170
III.2.1 Article accepté pour présentation à CIGI 2011 ..... 170
III.2.2 Article présenté à PRO-VE le 13 octobre 2010 ..... 178
III.2.3 Article présenté au colloque IJPE le 3 mars 2010 ..... 188
III.2.4 Article présenté au colloque PROPEDIA le 17 décembre 2009 ..... 201
III.2.5 Article accepté en juin 2011 à Production Planning and Control ..... 216
III.2.6 Article accepté en juillet 2011 pour un numéro spécial Production Planning and Control ..... 231

# Liste des figures et des tableaux

Figure 1 : Méthodologie ..... 13
Figure 2 : Synoptique de thèse ..... 13
Figure 3 : Parcours de flux (Hammami, 2003) ..... 18
Figure 4: Exemple de chaîne logistique (Kearney, 1994) ..... 20
Figure 5 : Exemple de chaîne logistique (supply chain council, 2000) ..... 20
Figure 6 : Chaîne logistique ..... 21
Figure 7 : Structure d'une chaîne logistique conjointe (Cheyroux L., 2003) ..... 22
Figure 8 : Agencement des ateliers de production (Essaïd, 2008) ..... 24
Figure 9 : Objectifs d'intégration (Fabbe-Costes, 2007) ..... 31
Figure 10 : Eléments et décisions clés de la gestion d'une chaîne logistique (Lambert and Cooper, 2000) ..... 32
Figure 11: Gestion de la chaîne logistique (adapte de Mentzer et al., 2001) ..... 32
Figure 12 : Cinq types de demande ..... 33
Figure 13 : Modèle SCOR (SCC, 2008) ..... 35
Figure 14: Niveaux des décisions (extrait et adapte de (Shapiro, 2007)) ..... 36
Figure 15 : Indicateurs de performance (Gruat La Forme-Chrétien 2007) ..... 36
Figure 16 : Pyramide des performances des systèmes de production (Senechal et al., 2003) . 37
Figure 17 : Représentation de l'effet de serre ..... 41
Figure 18 : Développement durable ..... 45
Figure 19 : Quatre scenarios de base pour 2100 adaptes de (GIEC, 2000) ..... 46
Figure 20 : Résultat de l'Europe des 15 par rapport à l'objectif du Protocole de Kyoto ( source : CDC mission cllimat) ..... 48
Figure 21 : Chronologie des marchés Carbone hors Europe ..... 49
Figure 22 : Acteurs de la compensation (Bellasen and Leguet, 2008) ..... 50
Figure 23 : Prix volatil (Mission Climat de la Caisse des Dépôts, 2008) ..... 51
Figure 24 : Prix des quotas Kyoto et européen ..... 52
Figure 25 : Logo de compensation carbone de l'ademe ..... 53
Figure 26 : Etiquetage casino ..... 53
Figure 27 : Etapes prises en compte dans le calcul de l'indice carbone ..... 53
Figure 28 : Logistique durable (Pan 2010) ..... 57
Figure 29 : "triple bottom line"(Guyonnaud and Willard, 2004) ..... 57
Figure 30 : Gestion de la chaîne logistique durable ..... 58
Figure 31 : Gestion environnementale de la qualité totale (Corbett and Klassen, 2006) ..... 60
Figure 32 : Implications de la gestion de la chaîne logistique verte ..... 61
Figure 33 : Construction de profils d'entreprises ..... 70
Figure 34 : Modèle de chaîne logistique ..... 71
Figure 35 : Modèle d'entreprise ..... 71
Figure 36 : Modèle de transport ..... 72
Figure 37 : Process de production ..... 72
Figure 38 : Structure du modèle sous ARENA ..... 73
Figure 39 : Schéma des règles au sein de l'entreprise ..... 73
Figure 40 : Exemple de numérotation pour l'entreprise 1 ..... 74
Figure 41 : Schéma des règles d'approvisionnement et de livraison pour la chaine logistique 74
Figure 42 : Schéma des règles de transport ..... 74
Figure 43 : Règles de livraison ..... 76
Figure 44 : Schéma des règles pour les entreprises 2 et 3 ..... 77

Figure 45 : Schéma des règles pour l'entreprise 1 ..... 77
Figure 46 : Composantes du TRS ..... 79
Figure 47 : Type de produits ..... 82
Figure 48 : descriptif d'un rack ..... 83
Figure 49 : Calibrage des temps d'attente en heures ..... 90
Figure 50 : Représentation des départs de transport toutes les cinq heures ..... 90
Figure 51: Calibrage des temps d'attente en heures ..... 91
Figure 52 : Calibrage des temps d'attente et de transport express en heures ..... 91
Figure 53 : Résultats des stocks totaux ..... 92
Figure 54 : 64 configurations de localisation ..... 98
Figure 55 : Représentation des 2560 configurations ..... 100
Figure 56 : Classification par la méthode des centres mobiles des 16 configurations selon les émissions ..... 104
Figure 57 : Classification par la méthode des centres mobiles des 32 configurations ..... 106
Figure 58 : Représentation des valeurs propres ..... 107
Figure 59 : Représentation des 32 configurations par ACP sur les deux premiers axes selon l'efficience ..... 108
Figure 60 : Classification des 64 configurations selon les émissions ..... 110
Figure 61 : Représentation des 64 configurations par ACP sur l'axe 1 et 2 ..... 111
Figure 62 : Dégradation des localisations ..... 114
Figure 63: Représentation des 22 configurations sur les axes 1 et 2 ..... 115
Figure 64 : Zoom sur 8 configurations sur les axes 1 et 3 ..... 117
Figure 65 : Représentation des 88 configurations ..... 119
Figure 66 : dendrogramme des 352 configurations ..... 120
Figure 67 : Représentation graphique des 8 configurations ..... 125
Figure 68 : Représentation des 32 configurations à efficacité dégradée ..... 126
Figure 69 : Représentation des 128 configurations ..... 128
Figure 70 : dendrogramme des 64 configurations à localisation quelconque ..... 131
Figure 71 : dendrogramme des 128 configurations ..... 133
Figure 72 : dendrogramme des 512 configurations quelconques ..... 135
Figure 73 : Résultats pour l'efficacité et la localisation ..... 139
Figure 74 : Résultats pour l'efficacité et le type de produits ..... 140
Figure 75: Résultats pour le type de produits et la localisation 1 ..... 141
Figure 76: Résultats de la deuxième localisation et du type de produits ..... 142
Figure 77 : Résultats pour le type de produits et la dernière localisation ..... 143

Tableau 1 : Résumé des définitions de la logistique (Akbari Jokar et al., 2000) ..... 19
Tableau 2 : Caractérisation des systèmes de production (d'après Silver et al, 1998 ; adaptation d' Essaïd, 2008) ..... 25
Tableau 3 : Liens entre processus manufacturier et plan directeur de production (Essaïd,2008 d'après Berry et Hill, 1992) ..... 26
Tableau 4 : Liens entre processus manufacturier et planification de la production (Essaïd, 2008 d'après Berry et Hill, 1992) ..... 27
Tableau 5 : Liens entre processus manufacturier et ordonnancement des opérations (Berry and Hill, 1992) ..... 27
Tableau 6 : Lien entre le type de demande et le mode de gestion (Newman and Sridharan, 1995) ..... 33

Tableau 7 : Définition du taux de rendement synthétique (AFNOR 60-182) ..... 37
Tableau 8 : Forçage radiatif des gaz à effet de serre (GIEC, 2007A) ..... 42
Tableau 9 : Profils d'entreprises ..... 70
Tableau 10 : Définition des différents temps ..... 78
Tableau 11 : Exemples de TRS et de ses paramètres ..... 79
Tableau 12 : Feuille de calcul des temps de process (Essaïd M., 2008) ..... 81
Tableau 13 : Données de transport ..... 81
Tableau 14 : Paramètres du produit 1 ..... 83
Tableau 15 : Paramètres du produit 2 ..... 84
Tableau 16: Paramètres du produit 3 ..... 84
Tableau 17 : Paramètres du produit 4 ..... 85
Tableau 18 : Facteurs d'émissions en gCO2 équivalent ..... 85
Tableau 19 : Paramètres de simulation des entreprises adaptes d'(Essaid, 2008) ..... 88
Tableau 20 : Durée des transports en heures ..... 89
Tableau 21 : Durée des transports et des attentes express en heures ..... 89
Tableau 22 : Scenarii des temps de transport en heures ..... 89
Tableau 23 : Résultats de 5 réplications de 40 000 heures ..... 93
Tableau 24 : Résultats des 10 réplications de 40 000 heures ..... 93
Tableau 25 : Contributions aux axes ..... 99
Tableau 26 : 16 simulations à localisation constante ..... 103
Tableau 27 : Résultats des 16 simulations à localisation constante et efficacité homogène en tonne équivalent $CO_2$ ..... 103
Tableau 28 : Résultats de l'ANOVA sur le type de produits avec 2560 configurations ..... 105
Tableau 29 : Résultats des 32 simulations a localisations LLL et RRR en tonne équivalent $co_2$ ..... 105
Tableau 30 : Variance expliquée pour les 32 configurations ..... 107
Tableau 31 : Contributions aux deux axes ..... 107
Tableau 32 : Classification des 32 configurations par ACP ..... 108
Tableau 33 : Résultats des 64 simulations à localisation et efficacité homogènes en tonne équivalent $CO_2$ ..... 109
Tableau 34 : Valeurs propres des 64 configurations homogènes ..... 110
Tableau 35 : Contributions aux axes 1 et 2 ..... 111
Tableau 36 : Valeurs propres ..... 114
Tableau 37: Contributions aux axes ..... 114
Tableau 38: Classification des 22 configurations par ACP ..... 116
Tableau 39 : Valeurs propres ..... 117
Tableau 40 : Contributions aux axes ..... 118
Tableau 41 : Classification des 88 configurations par ACP ..... 118
Tableau 42 : Barycentres des 5 classes ..... 120
Tableau 43 : Classement des 352 configurations ..... 122
Tableau 44 : Résumé du classement des 352 configurations ..... 122
Tableau 45 : Classification des 8 configurations ..... 124
Tableau 46 : Contributions aux axes des 32 configurations à efficacité dégradée ..... 126
Tableau 47 : Classification des 32 configurations ..... 126
Tableau 48 : Contributions aux axes de 128 configurations ..... 127
Tableau 49 : Classification des 128 configurations ..... 127
Tableau 50 : Résultats de l'analyse de la variance sur l'efficience avec 2560 configurations ..... 129
Tableau 51 : Barycentres des six classes composées de 64 configurations à localisation quelconque ..... 131

Tableau 52 : Composition des six classes ..... 132
Tableau 53 : Barycentres des trois classes ..... 133
Tableau 54 : Classement des 128 configurations à localisation quelconque ..... 135
Tableau 55 : Résumé du classement des 128 configurations ..... 135
Tableau 56 : Barycentres des 3 classes représentant les 512 configurations quelconques .... 135
Tableau 57 : Résultats de l'analyse de la variance sur efficacité/localisation/type de produits ..... 138
Tableau 58 : Résultats de l'analyse de la variance sur localisation 1/3/5 ..... 140

# Chapitre I INTRODUCTION

"Adding the ‘green’ component to supply-chain management involves addressing the influence and relationships between supply-chain management and the natural environment." (Srivastava, 2007))

I. 1. Contexte et problématique .....
I. 2. Objectifs .....
I. 3. Méthodologie de travail .....
I. 4. Plan .....

## I. 1. **Contexte et problématique**

Toute entreprise est à l'intersection de différentes chaînes logistiques. Or ces dernières évoluent dans un contexte en mutations constantes. Les entreprises ont donc besoin d'aide pour s’adapter et mesurer l'impact de leurs décisions dans le contexte actuel. Ainsi, dès les années 80, le domaine de la gestion de la chaîne logistique intéresse les entreprises. Des travaux sur les coordinations avec les fournisseurs et les clients tout au long de la chaîne logistique sont réalisés. Ces coordinations se révèlent bénéfiques pour l’entreprise. Aujourd'hui, ces mêmes entreprises sont poussées par leurs clients, les états, leurs actionnaires et toute autre partie prenante à avoir des pratiques plus durables. En effet, en 1987, l’Union Internationale pour la Conservation de la Nature donne la première définition du développement durable qui passa presque inaperçu (Mebratu, 1998). Le rapport Bruntland introduit la définition de « développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs » (Bruntland, 1987). Puis, le développement durable transposé à l'entreprise devient la responsabilité sociétale des entreprises. Celles-ci ont commencé à adopter ce concept depuis la fin des années 90 car il leur permet de se différencier de leurs concurrents. Cette tendance a pour résultats l’amélioration de facteurs environnementaux et sociaux mais aussi la réduction des coûts et même l’augmentation de leur compétitivité. Cependant, la chaîne logistique manque encore d’outils conceptuels pour comprendre la complexité des liens entre les indicateurs industriels (principalement stocks et délais) et l’impact environnemental d’une gestion quotidienne. Si les entreprises ne peuvent pas évaluer cet impact de manière satisfaisante, elles ne savent pas comment et dans quel secteur de la chaîne logistique prendre des décisions durables

(Chardine-Baumann and Botta-Genoulaz, 2009). Il s'agit ici pour l'entreprise de décisions stratégiques : choix des fournisseurs (efficacité, localisation), implantation de ses propres sites de production. Ces décisions doivent répondre au mieux à la demande du marché.

L'entreprise Carrier (groupe UTC), fabriquant de climatiseurs, s'insère parfaitement dans cette réflexion. Depuis 1993, elle s'est employée à réduire son empreinte écologique. En 2003, l'Agence Américaine pour la Protection de l'Environnement l'a reconnu comme leader dans la protection environnementale. Elle fabrique des produits innovants en travaillant sur la diminution de consommation d'eau et d'énergie. A présent, un autre axe de travail est le choix des fournisseurs comme le préconise (Seuring and Müller, 2008) et donc de leur efficacité et de leur localisation. Les données des produits fabriqués par les chaînes logistiques étudiées proviennent donc de cette entreprise.

Dans ce contexte, notre thèse, en s'appuyant sur des simulations "in vitro" de configurations de chaînes logistiques à profils différents, peut aider les entreprises dans leur prise de décision stratégique. Nous étudions comment le type de produits fabriqués, la localisation et l'efficacité des fournisseurs influencent la performance industrielle et la performance environnementale d'une chaîne logistique.

## I. 2. **Objectifs**

Cette thèse s'inscrit dans la continuité des travaux menés dans le laboratoire LSTI et notamment de la thèse d'(Essaïd M., 2008). Le modèle de chaîne logistique est élaboré dans le but d'utiliser les méthodes de simulation à événements discrets. Celles-ci permettent de générer différents scénarii et de les comparer. Nous utilisons une simulation "in vitro" qui permet d'instancier un modèle général. Ce modèle peut, par la suite, être complété ou amélioré.

Notre thèse se donne l'objectif de combler une partie du manque d'outils conceptuels qui permettent de relier indicateurs industriels et environnementaux. Il s'agit de construire un modèle de chaîne logistique le plus réaliste possible intégrant des critères environnementaux. Ces deux exigences ne devront pas rendre le modèle trop particulier ni trop complexe afin qu'il soit applicable à de nombreux secteurs et que la modélisation reste exploitable.

Nous nous focalisons sur :

- la modélisation et la simulation de chaîne logistique verte fabricant un produit et comportant trois entreprises aux profils différentiables,
- l'évaluation des performances financières à travers le niveau de stock et le nombre de kilomètres et des performances environnementales à travers les émissions d'équivalent $CO_2$,
- le benchmark des différentes configurations permettant de proposer des bonnes pratiques vertes aux entreprises.

Ces trois focus permettent de répondre à trois objectifs majeurs :

- créer un guide méthodologique d'aide à la décision en :
    - étudiant les impacts financiers et environnementaux de chacun des paramètres de simulation le long de la chaîne logistique,

  - déterminant le poids de chacun de ces paramètres,
  - analysant l'incidence de la dégradation de certains de ces facteurs,
- donner des éléments de réponse à la problématique d'une double performance économique et environnementale,
- enrichir la plate-forme de simulation du laboratoire.

## I. 3. **Méthodologie de travail**

Ces recherches sont à la frontière de différentes disciplines. Elles s'inscrivent en effet dans le cadre d'une démarche de génie industrielle mais font appel au génie de l'environnement, à l'économie et aux sciences de gestion. De plus, le fait d'avoir participé au projet de la région Rhône-Alpes MOCLD[1] a permis l'enrichissement constant de notre réflexion.

Notre thèse s'inscrit dans le cadre des problèmes de configuration, modélisation et simulation de chaînes logistiques vertes. Une fois notre périmètre d'étude défini grâce à une revue de littérature, nous devons évaluer les performances financières et environnementales de différentes chaînes logistiques vertes. Notre méthodologie se base sur une expérimentation d'un modèle de simulation de chaînes logistiques durables en laboratoire. A partir de l'état de l'art sur les chaînes logistiques vertes, nous concevons un modèle conceptuel aux paramètres aussi bien industriels qu'environnementaux. Il comporte trois maillons d'entreprises. Chacun est instancié par des caractéristiques communes (système de pilotage, type de process) et des facteurs de différenciation (efficacité de l'entreprise, type de produits fabriqués, localisation des sites de production). A partir de ce modèle conceptuel, nous créons un modèle de simulation à événements discrets. Nous considérons quatre classes d'efficacité, quatre types de produits possibles et quatre localisations. Seul le type de produits est constant le long de la chaîne logistique. Nous simulons l'ensemble des configurations. Puis selon un plan d'expériences, nous traitons les résultats à l'aide de méthodes statistiques. La figure suivante résume notre méthodologie :

[1] MOCLD – Management et organisation de chaînes logistiques durables et responsables», coordonné par JP Campagne, Liesp - G-Scop, G2I, Cerag, Let, Symme, Coactis, Listic, ESC St Etienne, 2010-2011

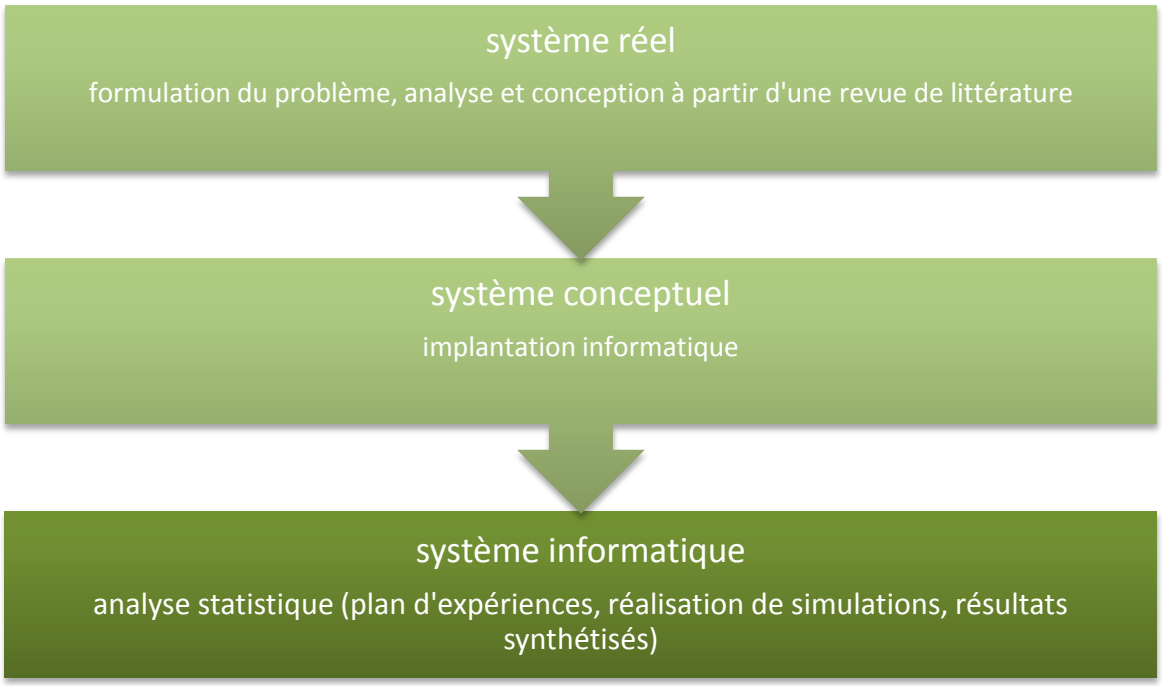



Figure 1 : Méthodologie

## I. 4. **Plan**

La thèse est organisée en trois parties : état de l'art, modèle de simulation et résultats de simulations :

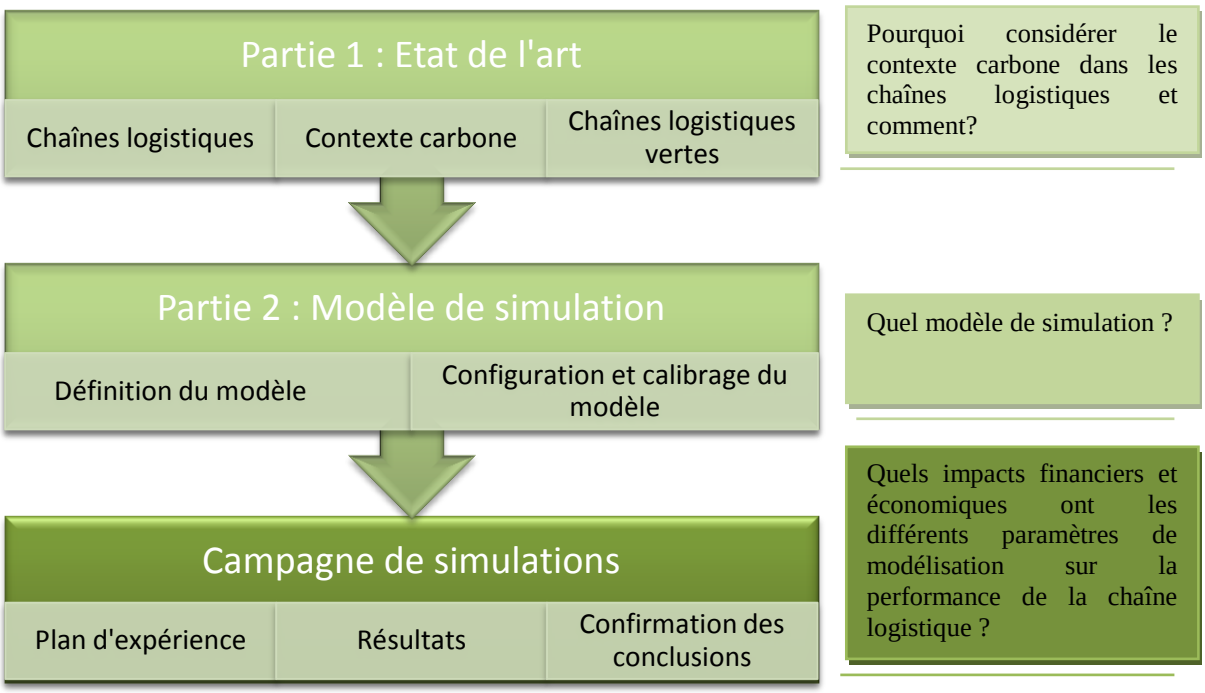



Figure 2 : Synoptique de thèse

La première partie permet de définir le périmètre de la thèse. Elle compte trois chapitres. Le premier chapitre porte sur l'état de l'art de la chaîne logistique. Nous en donnons différentes définitions, étudions sa gestion et sa performance. L'objectif ici est de délimiter notre périmètre d'étude en termes de chaîne logistique. A travers ce chapitre, nous voyons l'importance du contexte dans lequel évolue la chaîne logistique. Or, aujourd'hui le domaine de la responsabilité sociétale est crucial. Le deuxième chapitre traite donc du développement durable et notamment du contexte carbone. Il présente son historique avec le cycle des différentes conférences et la mise en place d'un marché européen du carbone. Il montre également les implications très fortes de ce contexte carbone pour les entreprises. Enfin, le troisième chapitre lie ces deux aspects en présentant les chaînes logistiques vertes ou durables. Il conclut sur les différentes études déjà menées ainsi que sur leur approche méthodologique.

La deuxième partie porte sur le modèle de simulation. Elle est organisée en deux chapitres. Ils décrivent notre méthodologie de recherche et notre modèle de chaîne logistique. Le chapitre 1 définit le modèle et ses paramètres de simulation. Nous choisissons les caractéristiques communes tels que le système de pilotage et le type de process de la chaîne logistique. De même, nous sélectionnons nos facteurs de différentiation tels que la localisation des sites de production, le type de produits fabriqués et l'efficacité de la chaîne logistique. Le chapitre 2 expose la configuration et la calibration du simulateur.

La troisième partie est composée de six chapitres. Le premier chapitre présente la campagne de simulations. Il fixe le plan d'expériences. Les quatre chapitres suivants expliquent les résultats des simulations par analyse statistique en suivant une méthodologie de plan d'expériences. Le dernier chapitre, par des analyses de variance, confirme les principales conclusions énoncées aux chapitres précédents.

Nous terminerons notre thèse par une conclusion et discuterons de perspectives de recherches.

# PARTIE 1 : ETAT DE L'ART

# Chapitre I. CHAINES LOGISTIQUES

I. 1. Définitions.....
I.1.1 Définition de la logistique.....
I.1.2 Définition d'une chaîne logistique .....
I.1.3 Discussion .....
I. 2. Caractérisation de la chaîne logistique.....
I.2.1 Caractérisation structurelle .....
I.2.2 Caractérisation organisationnelle.....
I.2.3 Caractérisation fonctionnelle .....
I.2.4 Discussion .....
I. 3. Gestion de la chaîne logistique .....
I.3.1 Historique.....
I.3.2 Contexte .....
I.3.3 Définition .....
I.3.4 Principes de base.....
I.3.5 Gestion des stocks.....
I.3.6 Discussion .....
I. 4. Performance de la chaîne logistique .....
I.4.1 Définition .....
I.4.2 Indicateurs de la performance.....
I.4.3 Discussion .....
I. 5. Conclusion .....

# I. 1. **Définitions**

## I.1.1 Définition de la logistique

La logistique vient du grec logistikos qui signifie art du raisonnement et du calcul (2004). Puis, on a parlé de logistique militaire en temps que moyens et méthodes d'organisation matérielle. A la fin de la seconde guerre mondiale est apparue la notion de logistique industrielle avec la reconversion d'anciens militaires en logisticiens (Akbari Jokar et al., 2000).

Mais l'apparition du concept de logistique apparaît au début du vingtième siècle avec le taylorisme. En effet, Taylor mit en place une organisation cherchant à définir la meilleure façon de produire le maximum. Dans les années 50-60, IBM lança les premiers logiciels informatiques de gestion industrielle. Puis, dans les années 70-80, la logistique prit un virage radical avec la complexification de ses paramètres. « L'optimisation des fonctions logistiques exige une spécialisation croissante des entreprises en raison de la diversité de l'offre, de la rapidité de l'évolution de la demande et de la mondialisation des sources d'approvisionnement. La maîtrise des flux logistiques est une condition indispensable à la compétitivité des entreprises, aussi bien industrielles que commerciales » (Paché and Colin, 2000b). Ce concept a donc évolué avec l'évolution du marché et des entreprises et représente une problématique en soi (Akbari Jokar et al., 2000)

(Lauras, 2004) indique qu'aux temps des grecs comme du nôtre le but est de permettre l'utilisation de produits. Dans ce sens, la norme officielle AFNOR (X 50-600) donne la définition suivante : « la logistique est la planification, l'exécution et la maîtrise des mouvements et des mises en place des personnes ou des biens, et des activités de soutien liées à ces mouvements et ces mises en place, au sein d'un système organisé pour atteindre des objectifs spécifiques » et elle est une fonction « dont la finalité est la satisfaction des besoins exprimés ou latents, aux meilleures conditions économiques pour l'entreprise et pour un niveau de service déterminé. Les besoins sont soit de nature interne (approvisionnement de biens et de services pour assurer le fonctionnement de l'entreprise) soit externe (satisfaction de clients) ».

La logistique fait appel à plusieurs métiers et savoir-faire qui concourent à la gestion et à la maîtrise des flux physiques et d'informations ainsi que des moyens mis en œuvre dans le cadre de ces activités. Dans cet ordre d'idée, en 1948, l'AMA adopte la définition suivante « la logistique concerne le mouvement et la manutention de marchandises du point de production au point de consommation ou d'utilisation », (Tixier et al., 1996).

Par la suite, on ne se cantonne pas à la distribution mais on intègre l'amont de la production : « La logistique est un terme employé dans l'industrie et le commerce pour décrire le vaste spectre d'activités nécessaires pour obtenir un mouvement efficient des produits finis depuis la sortie des chaînes de fabrication jusqu'au consommateur, et qui dans quelques cas inclut le mouvement des matières premières depuis leurs fournisseurs jusqu'au début des chaînes de fabrication. Ces activités incluent le transport des marchandises, l'entreposage, la manutention, l'emballage, le contrôle des stocks, le choix des emplacements d'usines et d'entrepôts, le traitement des commandes, les prévisions de marché et le service offert aux clients" (National Council of Physical Distribution Management (NCPDM), actuellement le Council of Logistics Management (CLM), 1962). Le NCPDM propose, quant à lui, en 1972 une autre définition : "la logistique est un terme décrivant l'intégration de deux (ou de

plusieurs) activités dans le but de planifier, mettre en œuvre et contrôler un flux de matières premières, de produits semi-finis et de produits finis, de leur point d'origine au point de consommation. »

(Hammami, 2003, Bowersox, 1969) absorbe toutes les fonctions dans sa définition : « la logistique concerne toutes les fonctions de l'entreprise : on s'intéresse désormais à la logistique amont (logistique d'approvisionnement), à la logistique interne (gestion de production) et à la logistique aval (logistique de distribution) : c'est l'aube de la logistique intégrée. ». Ce concept a été introduit par (Bowersox, 1969). Il est repris par (Samii, 1997):

"la logistique est le processus :

- qui anticipe les désirs et les volontés des clients;
- qui permet de se procurer le capital, les matières, les personnels, les technologies et l'information nécessaires pour réaliser ces désirs et volontés;
- qui permet d'optimiser et d'utiliser les réseaux de distribution de biens matériels, d'informations et de services afin de satisfaire complètement et rapidement la commande ou l'ordre placé par le client au plus juste coût."

De même, « the Logistic Institute » incorpore, quant à lui, les notions de flux d'informations et financiers (figure 3) : « la logistique est une collection de fonctions relatives aux flux de marchandises, d'informations et de paiement entre fournisseurs et clients depuis l'acquisition des matières premières jusqu'au recyclage ou à la mise au rebut des produits finis » (Tixier et al., 1996).

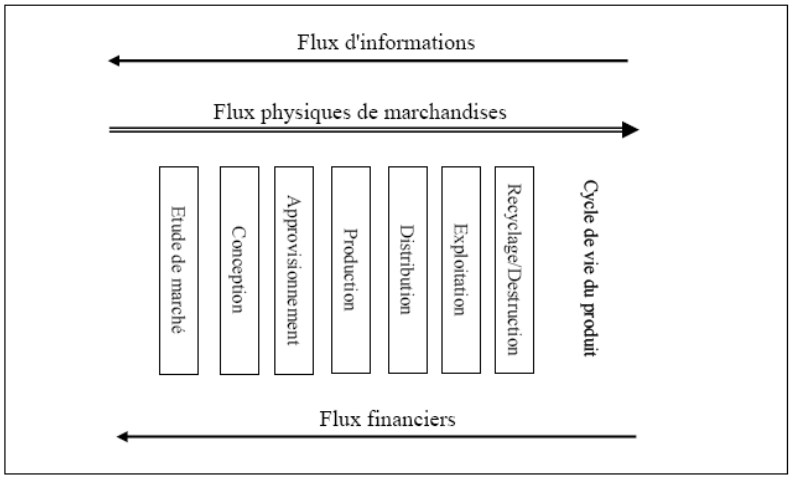



Figure 3 : Parcours de flux (Hammami, 2003)

Enfin, (Akbari Jokar et al., 2000) synthétise les définitions de la logistique de la manière suivante (tableau 1) :

| Critères \ Définition | | 1<br>1948<br>AMA | 2<br>1962<br>NCPDM | 3<br>1968<br>MAGEE | 4<br>1972<br>NCPDM | 5<br>Années 90<br>RATLIFF | 6<br>Années 90<br>ASLOG | 7<br>Années 90<br>IL | 8<br>Années 90<br>CLM | 9<br>Années 90<br>TLI |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Cycle de vie de produit* | **Etude de marché** | | | | | | | | | |
| | **Conception** | | | | | | | | | |
| | **Approvisionnement** | | | * | * | * | * | * | * | * |
| | **Production** | | | * | | * | * | * | * | * |
| | **Distribution** | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | **Exploitation** | | * | | | | | | * | * |
| | **Recyclage** | | | | * | | | | | * |
| *Les activités de base* | **Conception de produit** | | | | | | | | | |
| | **Achat** | | * | | * | * | * | | | * |
| | **Fabrication** | | | | | | | | | |
| | **Emballage** | | * | | * | | * | | * | * |
| | **Transport** | * | * | | * | * | * | | * | * |
| | **Manutention** | * | * | | * | | * | | * | * |
| | **Stockage** | | * | | * | * | * | | * | * |
| | **Vente** | | | | | | | | | * |
| | **Service après vente** | | * | | | | | | * | * |
| *Les activités soutien* | **Etude de marché** | | * | | * | | | | | |
| | **Informatique** | | | | | * | | * | * | * |
| | **Planification** | | * | * | * | * | * | | * | * |
| | **Contrôle** | | * | * | * | * | * | | * | * |
| | **Finance** | | | | | | | | | * |
| | **Personnel** | | | | | | | | | |
| | **Direction** | | | | | | | * | | |
| | **Engineering** | | | | | | | | | |
| | **Maintenance** | | | | | | | | | |

Tableau 1 : Résumé des définitions de la logistique (Akbari Jokar et al., 2000)

D'après le tableau 1, la plupart des publications s'entendent pour considérer l'approvisionnement, la fabrication et la distribution dans le cycle de vie du produit. Peu rajoutent l'exploitation et le recyclage mais aucune n'intègre l'étude de marché ou la conception. Pour les activités de base, les résultats sont plus variés. Le plus courant est l'achat, le transport et le stockage. Enfin dans les activités de soutien, nous notons la planification et le contrôle.

### I.1.2 Définition d'une chaîne logistique

La notion de supply chain a été donnée en 1982 par Oliver et Webber. Les deux termes supply chain et chaîne logistique sont considérés comme similaires et sont utilisés indifféremment. Elle comporte trois éléments principaux : fournisseurs, producteurs et clients (Chidambaram et al., 1999). Il existe de nombreuses définitions de la chaîne logistique liées respectivement aux définitions de la logistique. D'après les trois définitions suivantes, une chaîne logistique se compose de l'ensemble des entreprises impliquées dans la fabrication et la vente d'un produit fini :

"La chaîne logistique est un réseau d'installations qui assure les fonctions d'approvisionnement en matières premières, de transformation de ces matières premières en composants puis en produits finis, et de distribution du produit fini vers le client." (Lee and Billington, 1993)

" Une chaîne logistique est un ensemble de deux ou plusieurs entreprises liées par des flux de marchandises, d'informations et financiers." (Tsay, 1999)

"La chaîne logistique d'un produit fini se définit comme l'ensemble des entreprises qui interviennent dans les processus d'approvisionnement en composants, de fabrication, de distribution et de vente du produit, du premier des fournisseurs au client ultime" (Rotta-Franz et al., 2001)

La chaîne logistique est l'« ensemble des entreprises qui interviennent dans le processus de fabrication, de distribution et de vente du produit, du premier des fournisseurs au dernier au client ultime ». (Rota et al., 2002)

« Une chaîne logistique désigne un système intégré qui synchronise une série de processus en corrélation d'affaires dans le but de: acheter les matières premières et les pièces, transformer ces matières premières et ces composants en produits finis, ajouter de la valeur à ces produits, distribuer ces produits à des distributeurs ou aux clients, les promouvoir et faciliter l'échange de l'information parmi ces diverses entités » (Min and Zhou, 2002).

(Kearney, 1994) synthétise une chaîne logistique de la façon suivante (figure 4) :

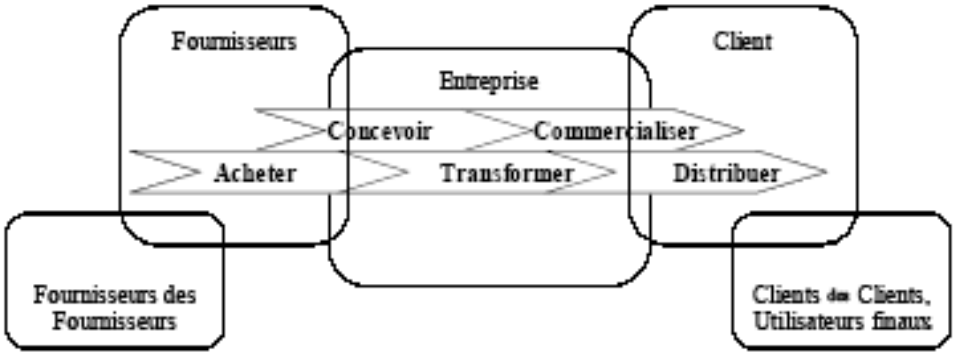



Figure 4: Exemple de chaîne logistique (Kearney, 1994)

Une autre définition ne considère pas la chaîne logistique comme l'ensemble des entreprises mais comme un ensemble de relation clients-fournisseurs (Tayur et al., 1999) (figure 5) :

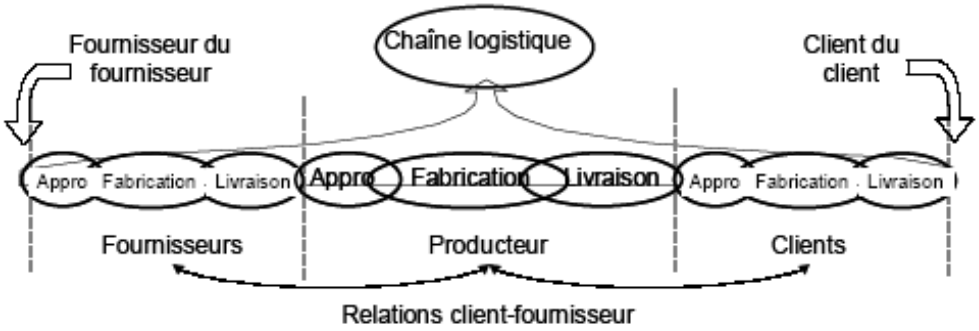



Figure 5 : Exemple de chaîne logistique (supply chain council, 2000)

Cette définition met l'accent sur les flux connectant les entreprises entre elles. (Lauras, 2004) souligne que lorsque le concept de chaîne logistique est abordé du point de vue d'une entreprise, on considère l'ensemble des chaînes logistiques qui incluent l'entreprise en se limitant parfois aux fournisseurs et aux clients de l'entreprise, mais en considérant les différents flux de produits. (Thierry, 2003) souligne que cette vision de la chaîne logistique est pertinente quand il s'agit d'étudier des problématiques liées aux relations d'une entreprise focale (donneur d'ordre) avec ses fournisseurs et sous-traitants.

(Courtois et al., 2006) propose, quant à lui, une représentation en pipe-line :

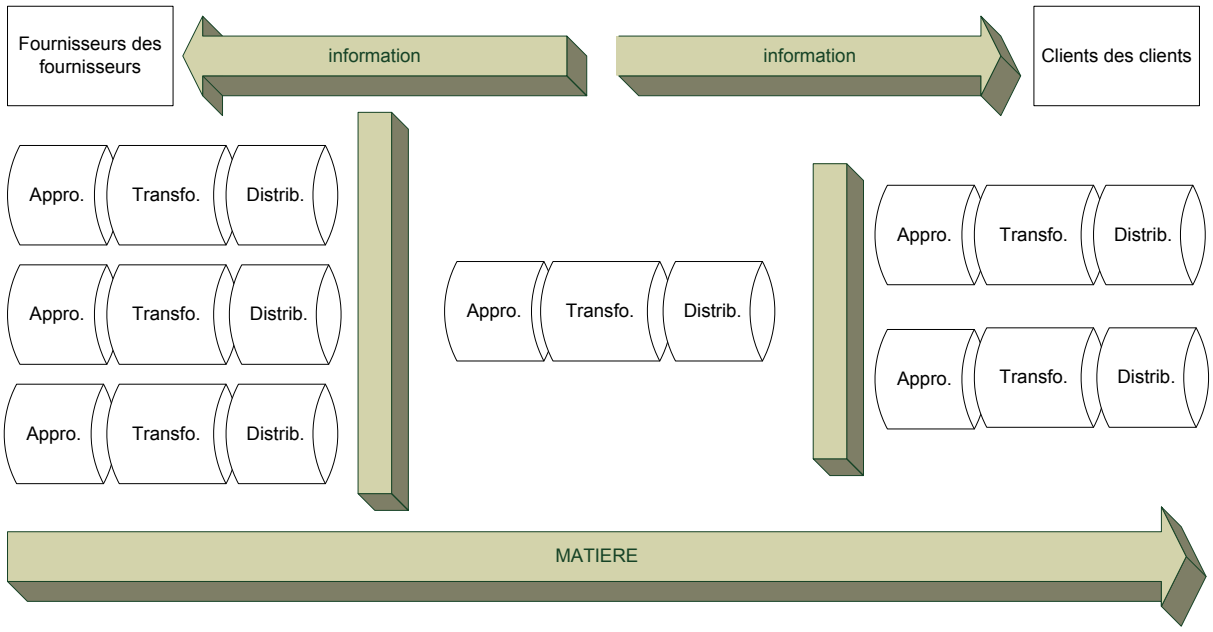



Figure 6 : Chaîne logistique

## I.1.3 Discussion

Les différentes définitions de la logistique montrent que, si au départ, la logistique était réduite à l'optimisation de la production à travers les flux matériels, elle a aujourd'hui évolué. Nous retiendrons, pour notre étude, la définition suivante : la logistique est l'ensemble des flux matériels et d'informations circulant du fournisseur de matières premières au client final. A partir de cette définition générale, nous avons étudié la notion de chaîne logistique. La plupart des auteurs s'accordent pour intégrer au moins cinq maillons : fournisseur du fournisseur, fournisseur, entreprise, client et client du client. Une fois le nombre d'entreprises défini, il faut également en déterminer les activités. Notre modèle doit être facilement simulable et généralisable. Pour cela, nous avons donc retenu la représentation de (Courtois et al., 2006). Notre modèle de chaîne logistique sera donc centré sur les approvisionnements, les transformations et la distribution.

Une fois la chaîne logistique définie, elle se caractérise de différentes manières :

- structurelle,
- organisationnelle,
- fonctionnelle.

## I. 2. **Caractérisation de la chaîne logistique**

### I.2.1 Caractérisation structurelle

(Lambert and Cooper, 2000) propose une structure tridimensionnelle :

- dimension horizontale : nombre de niveaux le long de la chaîne
- dimension verticale : nombre de fournisseurs et clients à chaque niveau horizontal
- place de l'entreprise étudiée

A partir de cette structure de base, on peut définir 3 grandes familles (BEA 01) :

- chaîne convergente : les flux manufacturiers convergent vers un seul et même site
- chaîne divergente : opposé du cas précédent
- chaîne conjointe (figure 7)

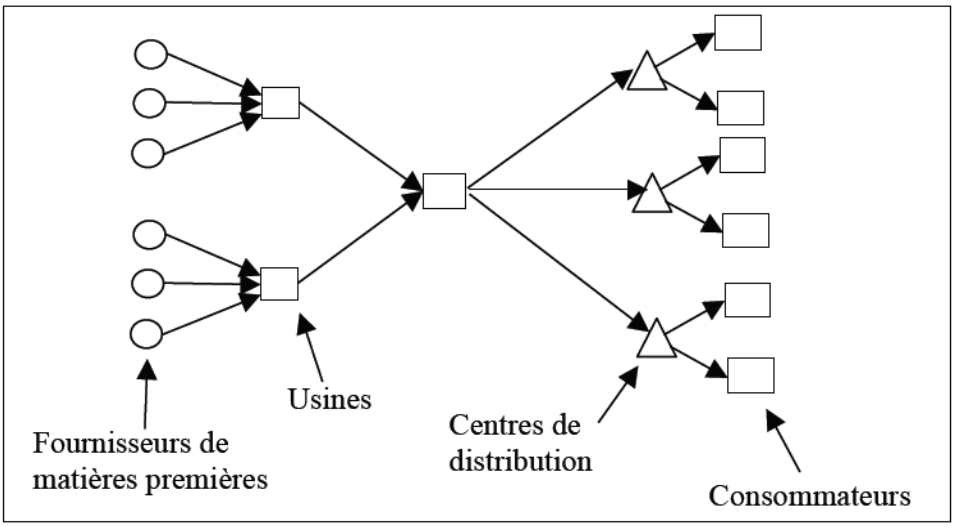



Figure 7 : Structure d'une chaîne logistique conjointe (Cheyroux L., 2003)

Pour notre modèle, nous retiendrons une structure simple avec un niveau vertical et cinq niveaux horizontaux.

### I.2.2 Caractérisation organisationnelle

Trois grandes organisations sont à retenir :

- l'organisation en réseau est un ensemble d'entreprises coopérant et s'appuyant sur les compétences de chacun des partenaires (Gruat La Forme-Chrétien 2007).

"Les réseaux d'entreprises sont des constructions coopératives à moyen et long terme qui, dans leur forme la plus achevée, s'appuient sur l'intérêt mutuel et réciproque des partenaires en présence." (Nunes, 1994)

- l'organisation virtuelle « est une agrégation temporelle de compétences et de ressources qui collaborent ensemble pour un besoin spécifique tel une opportunité d'affaire." (Goranson et al., 1997)

- l'organisation fédérale : « est constituée d'un petit siège et d'un grand nombre d'unités qui travaillent sous le même nom. A la tête de chaque unité, il y a des chefs qui s'apparentent plus à des leaders. Les décisions sont prises par l'ensemble des chefs. Le centre (siège) traite seulement ce que les unités ne peuvent pas traiter (principe de subsidiarité). Il coordonne, conseille et suggère. Cette forme permet d'avoir une grande taille tout en gardant les avantages des petites unités." (Feldman, 1991)

La chaîne logistique est impactée à son échelle par ces différentes organisations des entreprises. Afin de toujours répondre à nos objectifs de recherches, l'organisation en réseau nous semble la plus adaptée pour notre modèle.

### I.2.3 Caractérisation fonctionnelle

#### I. 2. 3. 1 Systèmes de production

Pour (Sharman, 1984), le point de pénétration de la commande du client final est le dernier point de la chaîne logistique où les stocks sont maintenus ; (Olhager and Rudberg, 2002) précise que c'est le point sur la chaîne où le produit est spécifié pour le client. Ce point de pénétration définit les stratégies de système de production (2008b). Il en existe trois :

-MTO, make to order, pour les produits spécifiques avec un point de pénétration au niveau des composants

-MTS, make to stock, pour les produits standards avec un point de pénétration au niveau des produits finis

- ATO, assembly to order, avec un point de pénétration au niveau des produits semi-finis.

Selon ces modes de production, l'organisation de la chaîne peut être de plusieurs types.

Notre modèle doit être adapté à plusieurs produits et nous n'étudions pas le procédé même de fabrication de ces produits. Il nous semble donc judicieux de choisir un système adapté aux produits standards tel que le MTS.

#### I. 2. 3. 2 Organisation de la chaîne

La chaîne logistique est organisable de trois manières différentes :

- en série unitaire : mobilisation de toutes les ressources pour un seul projet (cas particuliers)

- en ateliers spécialisés :

- open shop : l'itinéraire du produit est aléatoire

- job shop : l'itinéraire des flux est différent selon les produits à l'intérieur de l'atelier

- flow shop : l'itinéraire est identique pour un même groupe de machines. (Giard, 2005)

Ce mode de production entraîne de fortes contraintes d'approvisionnement et notamment de longs temps d'attente entre les machines.

- en lignes de production ou d'assemblage : soit une ligne est dédiée à un produit soit plusieurs produits sont fabriqués sur la même chaîne. Il y a alors de fortes contraintes d'ordonnancement.

La figure synthétise ces modes de production :

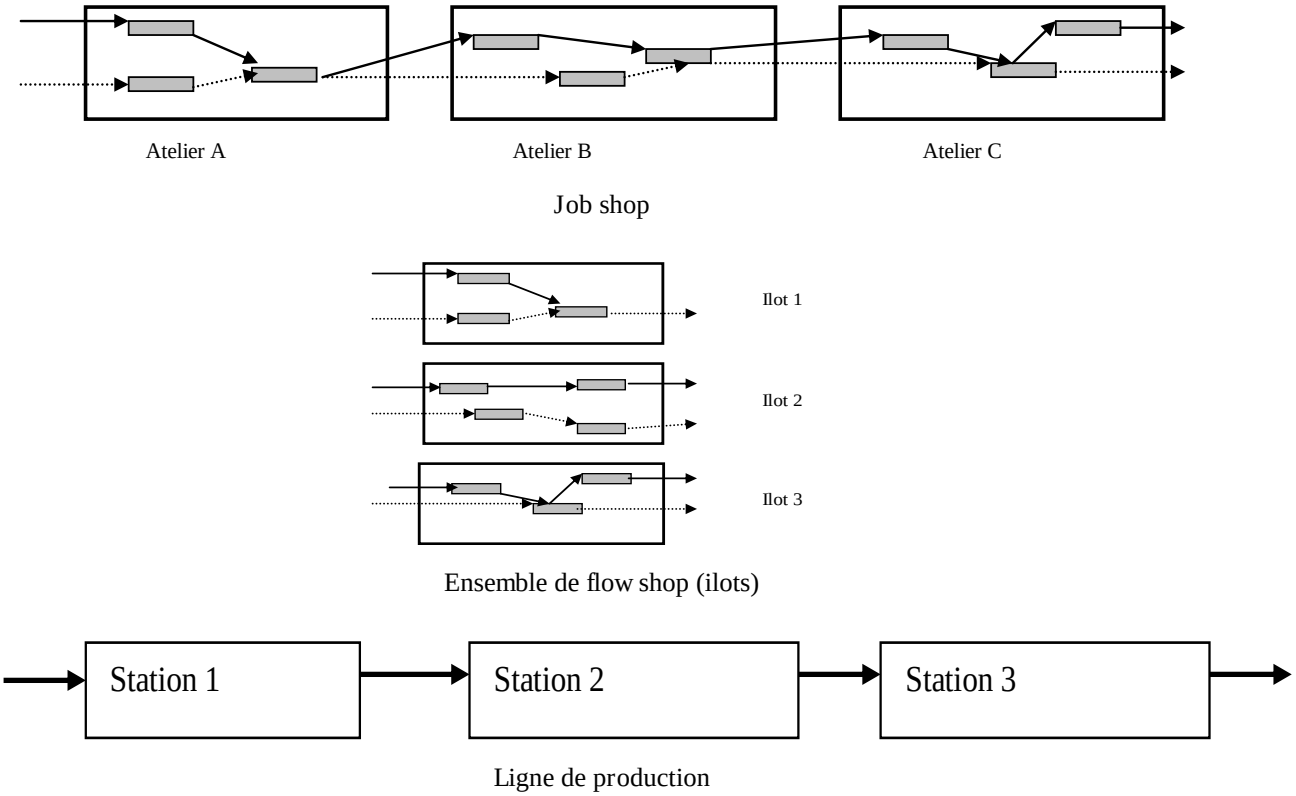



Figure 8 : Agencement des ateliers de production (Essaïd, 2008)

Les différences entre ces modes de production sont décrites dans le tableau suivant (tableau 2).

Dans la continuité de nos choix précédents, nous choisirons donc une production en lignes pour fabriquer des produits standards.

| Caractéristiques | Job shop | Flow shop | Ligne |
|---|---|---|---|
| **Nombre clients** | + + + + | + + + | + + |
| **Nombre produits** | + + + + | + + + | + + |
| **Différenciation produits** | customisé | moins customisé | standardisé |
| **Besoins matériels** | prévision difficile | plus prévisible | prévisible |
| **Contrôle fournisseurs** | + | + + | + + + + |
| **Intégration verticale** | - | peu | peu en amont, plus aval |
| **Stocks MP**<br>**WIP**<br>**PF** | faible<br>+ + +<br>faible | moyen<br>+ +<br>variable | varié, appros fréquents<br>+<br>grand |
| **Ordonnancement** | incertain , changements fréquents | changements rapides fréquents | établi |
| **Objectifs production** | Augmentation de taux d'utilisation, gestion goulets | Optimisation processus, réponse à divers besoins | Amélioration de la productivité des lignes |
| **Travail / matériel /capital** | Travail | Travail et matériel | Matériel et travail |
| **Taille usine** | + | + + | + + + + |
| **Niveau automatisation** | + | + + | + + + + |
| **Nombre MP** | + | + + | + + + + |
| **Goulets** | changeant | peu changeant, prédictible | stable |
| **Cadence** | + | + + | + + + |
| **Process flow** | flexible | quelques configurations dominantes | configuration rigide |
| **Type equipments** | polyvalents | polyvalents+ spécialisés | spécialisés (+ - sophistiqués) |
| **Flexibilité output** | + + + | + + | + (ATO ) |
| **Taille des séries** | + | + + | + + + + |
| **Définition capacité** | floue | variable | claire, en terme d'output |
| **Augmentation capacité** | incrémentale | variable | nécessité re-engineering |
| **Changements process pour nouveaux produits** | incrémental | souvent incrémental | incrémental ou radical |
| **Nature de la maintenance** | curative | curative ou préventive | préventive |

Tableau 2 : Caractérisation des systèmes de production (d'après Silver et al, 1998 ; adaptation d' Essaïd, 2008)

I. 2. 3. 3 Type d'approvisionnements

Une fois que l'on a défini le type de production à mettre en place, il faut définir le type d'approvisionnements (Reeve, 2002) :

- basée sur les taux : les approvisionnements en composants sont planifiés à partir de calcul de taux de composants à produire basé sur des prévisions. La production est indépendante.

- basée sur les temps : la planification d'approvisionnement et le lancement de la production sont liés. C'est la méthode classique employée en MRP (Essaïd, 2008).

La politique d'approvisionnements de notre modèle se basera sur les temps.

I. 2. 3. 4 Type de flux

Enfin, il faut contrôler la production. Ce contrôle est caractérisé par un type de flux :

- flux poussés : les composants sont produits d'après un planning de besoins en produits finis,

- flux tirés : les composants sont produits d'après la demande du poste de travail situé en aval.

Ces caractéristiques fonctionnelles sont liées entre-elles de la manière suivante (tableaux 3 à 5) :

| Variables stratégiques | PDP (master scheduling) | | |
|---|---|---|---|
| | MTO | ATO | MTS |
| *Marché* | | | |
| Produits : type | Spécialisé → | | standard |
| Variété | Grande → | | faible |
| Volume /produit/période | petit → | | grand |
| Livraison : rapidité | difficile → | | facile |
| fiabilité | difficile → | | facile |
| *Fabrication* | | | |
| Choix du process | Jobbing/ petites séries → | | ligne/ grandes séries |
| Gestion des variations de la demande et du mix | Commandes urgentes, en retard | à partir du WIP et de stocks de PF | à partir de stocks de PF |
| Amélioration des délais de livraison | ré-ordonnancement des besoins | Réduction des temps d'attente | élimination des temps d'attente |

Tableau 3 : Liens entre processus manufacturier et plan directeur de production (Essaïd,2008 d'après Berry et Hill, 1992)

| Variables stratégiques | Planification des besoins (requirements planning) | |
|---|---|---|
| | Basé sur les temps | Basée sur les taux (quantités) |
| *Marché* | | |
| Produits : type | Spécialisé → | standard |
| Variété | Grande → | faible |
| Volume /produit/période | Petit → | grand |
| Habilité d'adaptation aux variations du mix produits | Grand potentiel → | limité |
| Livraison : changements des plannings | Difficile → | Facile |
| rapidité | ré-ordonnancement / capacité | Par les stocks |
| *Fabrication* | | |
| Choix du process | Par lots | Ligne |
| Réduction des coûts : Fixes | Non | oui |
| Stocks | Non | oui |

Tableau 4 : Liens entre processus manufacturier et planification de la production (Essaïd, 2008 d'après Berry et Hill, 1992)

| Variables stratégiques | Ordonnancement et Contrôle (shop-floor control) | |
|---|---|---|
| | Flux poussé | Flux tiré |
| *Marché* | | |
| Produits : type | Spécialisé → | Standard |
| Variété | Grande → | Faible |
| Volume /produit/période | Petit → | grand |
| Habilité d'adaptation aux variations de la demande : | | |
| Volume total | Facile / incrémental → | Difficile |
| Mix produits | Grande → | Faible |
| Livraison : changements des plannings | Plus difficile → | moins difficile |
| rapidité | ré-ordonnancement | stocks de PF |
| *Fabrication* | | |
| Choix du process | Jobbing/ petites séries → | Ligne/ grandes séries |
| Réduction des coûts : Fixes | Faible → | grande |
| Stocks | Faible → | grande |
| Coût de changement de séries | Grand → | faible |
| Contrôle organisationnel | Centralisé → | décentralisé |

Tableau 5 : Liens entre processus manufacturier et ordonnancement des opérations (Berry and Hill, 1992)

### I.2.4 Discussion

Une chaîne logistique est donc caractérisée par trois paramètres de trois niveaux différents mais liés entre eux : sa structure, son organisation et ses fonctionnalités regroupant son type de production, l'organisation de cette production, ses types de planification et de flux. Les tableaux 3 à 5 synthétisent les liens entre ces éléments et confirment nos choix. En effet, comme la fabrication choisie concerne des produits standards avec une faible variété, le tableau 3 corrobore un système de production MTS avec un process en lignes et grandes séries. De même, le tableau 4 valide notre choix d'une planification basée sur les temps avec un fabrication par lots. Enfin, le tableau 5 entérine un ordonnancement en flux tiré.

Notre chaîne logistique sera donc définie de la manière suivante : un fournisseur de matières premières, trois producteurs, un client final. Elle aura une organisation en réseau avec un processus en lignes de production, un système de production en MTS, un type d'approvisionnements basé sur les temps, un ordonnancement en flux tiré.

Mais comment gérer cette chaîne logistique?

## I. 3. **Gestion de la chaîne logistique**

### I.3.1 Historique

L'intérêt dans la gestion de la chaîne logistique est apparu dans les années 80 quand les entreprises ont compris les profits qu'elles pouvaient engendrer en ayant une collaboration tout au long de leur organisation (Lummus and Vokurka, 1999). (Manrodt et al., 1997) rajoute que les entreprises qui ont adopté le point de vue de la chaîne logistique ont vu leur part de marché et leur leadership grandir ainsi que leur performance opérationnelle et financière augmenter. L'objectif est donc d'intégrer la performance logistique dans toutes les facettes d'une affaire (Capar et al., 2003).

La gestion de la chaîne logistique vient à l'origine de la mise en place du juste à temps[2] chez Toyota (Koskela and Vrijhoef, 1999) puis s'est complexifiée et a pris de l'importance durant les dix dernières années (Alford et al., 2005).

Pour (Forester, 1958), la gestion de la chaîne logistique indique une percée majeure dans la compréhension du succès d'une industrie. Ce dernier est lié aux interactions entre les flux d'informations, de matières premières, financiers, de main d'œuvre et de biens d'équipements. La manière dont ces cinq flux interagissent pour s'amplifier et causer changements et fluctuations donne les bases pour anticiper les effets des décisions, des politiques, des organisations et des choix d'investissements. En identifiant les problèmes-clé du management, il pose la première définition de la gestion de la chaîne logistique. En 1982, Oliver et Weber utilisent pour la première fois le terme. Puis (Lambert et al., 1997) le rend

[2] Le juste à temps permet d'apporter une matière première sur une chaîne en quantité adéquate et au bon moment pour limiter le stock et a été initié chez Toyota (Shingo, 1988)

plus usuel. (Mentzer et al., 2001) indique qu'il est difficile d'ouvrir un journal spécialisé sans trouver un article sur ce thème.

### I.3.2 Contexte

Les clients ont aujourd'hui les cartes en main : ils peuvent choisir leur fournisseur partout dans le monde. Il est donc essentiel que ces derniers repensent leur management et leur stratégie pour être les plus performants (Chidambaram et al., 1999). Les entreprises sont de plus en plus spécialisées et recherchent des fournisseurs fabricant mieux et moins cher qu'elle-même ; or pour réussir il faut que les fournisseurs réussissent aussi (Lummus and Vokurka, 1999). C'est la différence entre production intégrée et externalisée.

Dans ce but, la gestion de la chaîne logistique est un outil de performance : il doit « répondre au triple objectif d'amélioration des niveaux de service, de réduction des coûts et de création de valeur, en gérant les relations, tant en amont qu'en aval avec les fournisseurs et les clients » (Carbone and Meunier, 2006). En effet, tous les services d'une entreprise ont tendance à travailler séparément et à suivre leurs propres objectifs ; or, ce manque de coordination dessert l'intérêt général de l'entreprise. Il faut donc un management global (Chidambaram et al, 1999).

Enfin, pour (Hines, 1994) la chaîne logistique commence au niveau du client final. Sans lui, pas de commandes, pas de prix, etc. Le management global doit donc commencer par lui.

### I.3.3 Définition

Il est difficile de trouver une définition universelle de la gestion de la chaîne logistique : (Mentzer et al., 2001) précise que le terme "gestion de la chaîne logistique" peut renvoyer à plusieurs définitions : une définition opérationnelle, une définition plus philosophique et une définition en terme de procédés managériaux.

De plus, le terme est en constante évolution. Mais il ne faut pas confondre la gestion de la chaîne logistique avec différentes autres gestions (logistique, des stocks, de distribution etc.) : elle englobe tout (Lummus and Vokurka, 1999). Elle « traite la totalité des flux de matériels du fournisseur au client final » (Jones and Riley, 1985). Pour (Monczka and Morgan, 1997) « l'objectif premier de la gestion de la chaîne logistique est d'intégrer et manager les approvisionnements, les flux et le contrôle des matières premières dans un contexte de fonctions et fournisseurs multiples ». (Stevens, 1989) intègre la vision client et indique que « les objectifs de la gestion de la chaîne logistique sont de synchroniser les besoins du client avec les flux de matériaux provenant des fournisseurs afin d'effectuer un équilibrage entre ce qui est vu comme des objectifs contradictoires : niveau de service élevé, réduction des coûts et création de valeur. »

Nous avons retenu les définitions suivantes :

« La coordination systémique, stratégique et la gestion tactique des actions au sein des départements d'une organisation particulière, ainsi que des affaires menées à l'intérieur de la chaîne d'approvisionnement. Elles ont pour but d'améliorer la performance long terme de chaque organisation et de la chaîne d'approvisionnement des organisations dans leur ensemble.» (Mentzer et al., 2001)

« La gestion de la chaîne logistique est une fonction intégratrice dont la principale responsabilité est de relier les fonctions et processus clés au niveau intra et inter-organisationnel pour former un business model cohérent et hautement performant » (CSCMP).

« L'intégration de tous les processus clé d'une entreprise du dernier maillon au fournisseur initial qui approvisionne en produits, services, informations qui apporte de la valeur au client et autre intéressé. » (GSCF)

L'intégration décrite dans les trois définitions précédentes est un élément très important et a un fort impact sur la gestion de la chaîne logistique. Nous allons donc approfondir cette notion.

D'après (Fabbe-Costes, 2007), le périmètre de l'intégration est à géométrie variable dans la mesure où il peut englober différentes composantes : les flux qu'ils soient physiques, d'information ou financiers, les processus et activités, les systèmes et technologies et les acteurs. L'intégration des flux est la composante la plus importante car d'elle dépend la performance de la chaîne logistique : pour être efficace, il faut que la chaîne logistique produise ce qu'elle a en commande (Mathe and Tixier, 2005). Les autres composantes sont des conditions de l'intégration des flux et peuvent être interdépendantes (Fabbe-Costes, 2007).

On peut ensuite se demander quels objectifs d'intégration il faut atteindre :

- inter-organisationelle (Pagell, 2004) : par exemple relier la logistique avec le marketing. Pour (Fawcett and Magnan, 2002), la gestion de la chaîne logistique est plus centrée sur l'intégration interne qu'externe.
- inter-organisationnelle limitée (Harland, 1996) : relier la chaîne logistique à ses fournisseurs et clients de premier rang,
- inter-organisationelle étendue (Harland, 1996) (Persson, 2004) (Mentzer et al., 2001) : relier la chaîne logistique à l'ensemble des partenaires,
- multi-chaînes (Harland, 1996) : relier l'ensemble des chaînes,
- sociétale (Paché and Colin, 2000a) : prendre en compte l'environnement et le développement durable.

La figure 9 résume ces différents objectifs d'intégration.

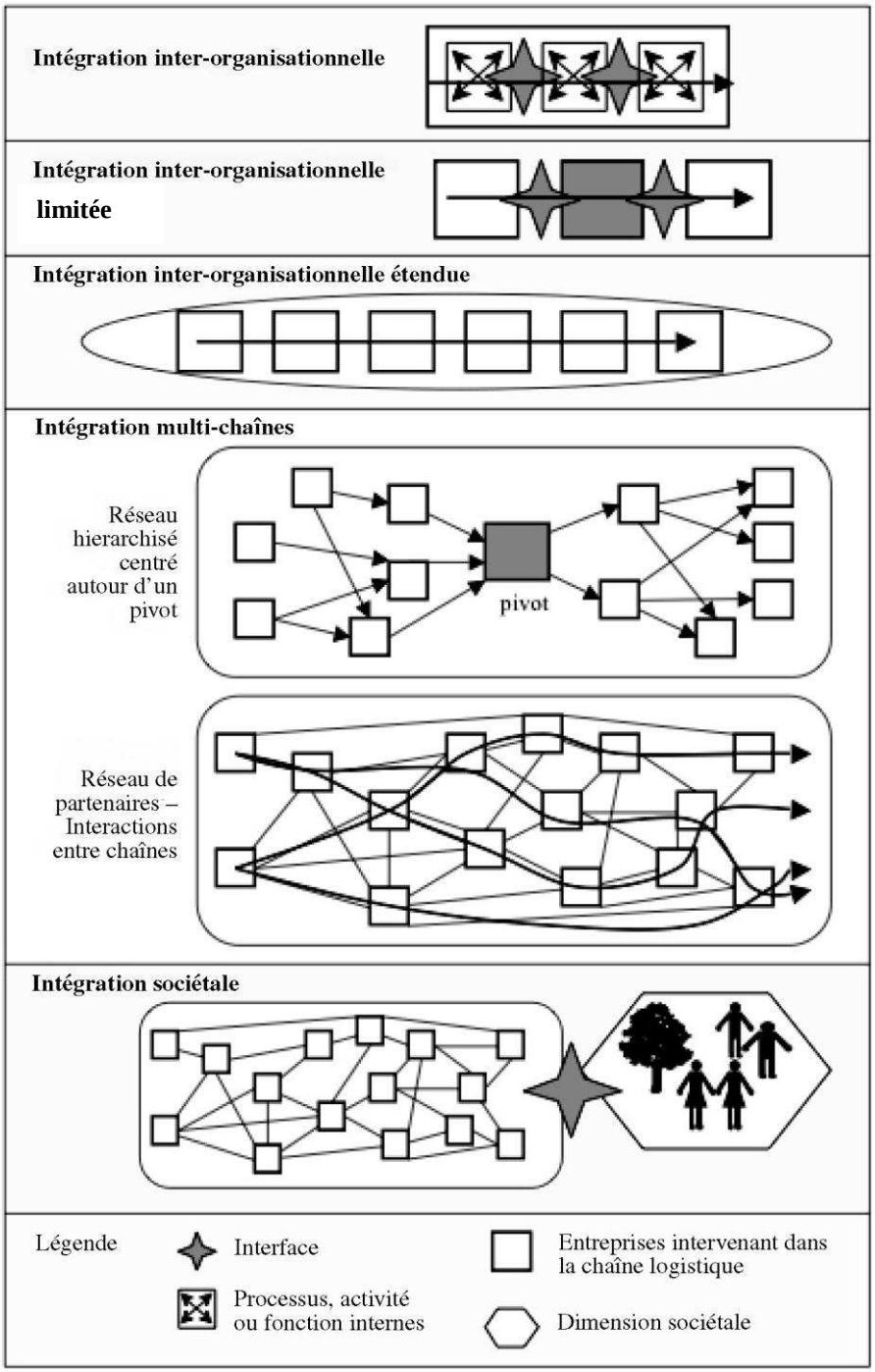



Figure 9 : Objectifs d'intégration (Fabbe-Costes, 2007)

Il reste enfin le degré d'intégration : chaque composante est associée à un objectif. (Lambert et al., 1998) pense que le niveau optimal n'est pas forcément l'intégration maximale contrairement à (Frohlich and Westbrook, 2001) pour qui ceci implique plus de performance. (Fabbe-Costes, 2007) considère qu'une chaîne logistique avec « une intégration maximale à tous les niveaux n'est ni réaliste ni intéressante et il est préférable de concentrer les efforts sur des interfaces judicieusement sélectionnées ».

La figure 10 synthétise les éléments et décisions clé de la gestion de la chaîne logistique :

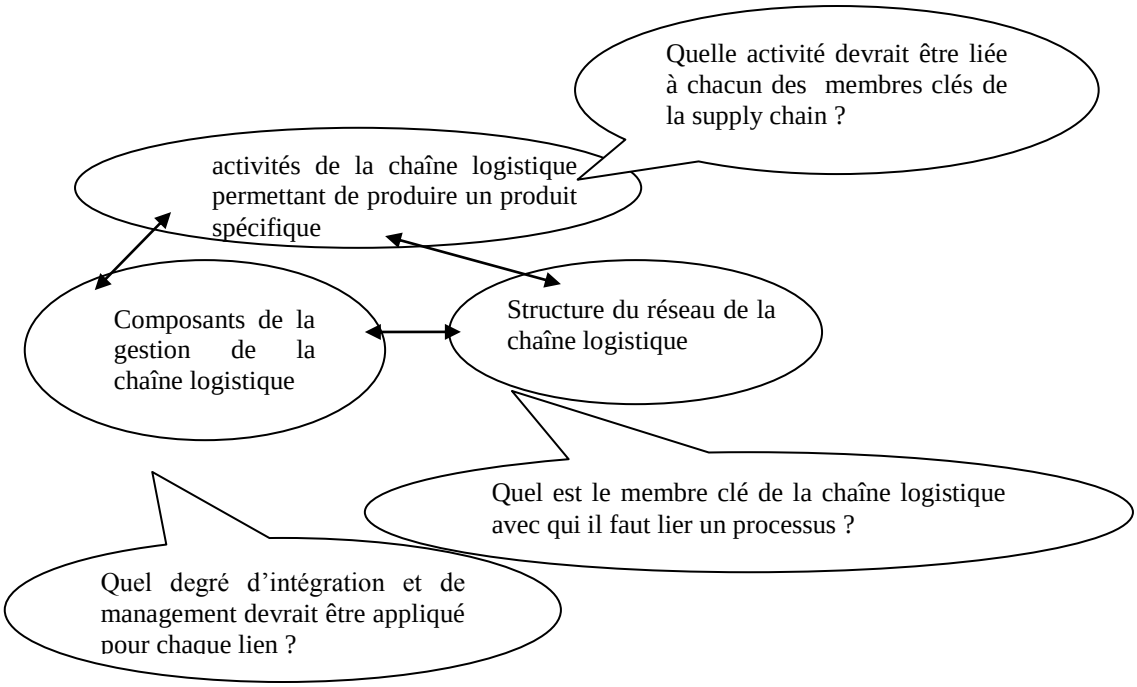



Figure 10 : Eléments et décisions clés de la gestion d'une chaîne logistique (Lambert and Cooper, 2000) .

Pour (Tan, 2001), il n'existe pas de définition stricte de la gestion de la chaîne logistique et d'un point de vue pratique, il préconise de ne prendre en compte que les acteurs principaux de la chaîne logistique. (Mentzer et al., 2001) résume la gestion de la chaîne dans la figure 11. Les flux logistiques sont au cœur de cette gestion.

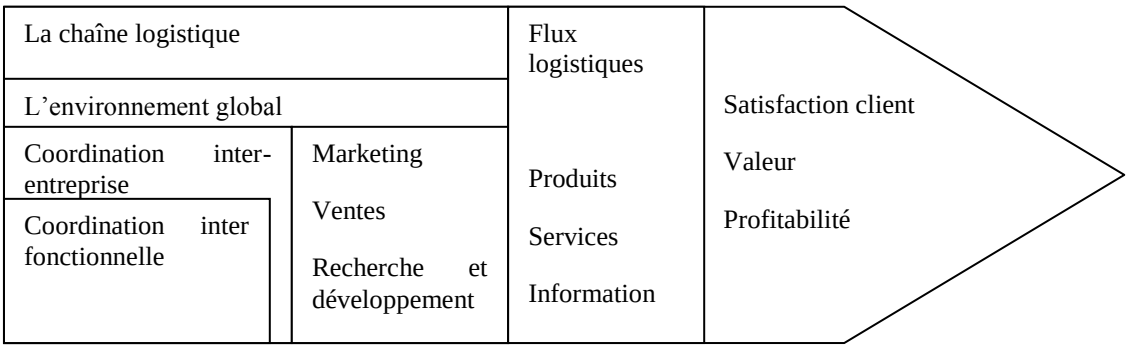



Figure 11: Gestion de la chaîne logistique (adapte de Mentzer et al., 2001)

## I.3.4 Principes de base

La gestion de la chaîne logistique poursuit des objectifs multiples et se trouve au cœur de l'activité de l'entreprise. (Harland and Scharlacken, 1997) propose six principes pour synthétiser les missions premières de cette activité :

- intégrer la chaîne logistique aux autres activités pour avoir un but commun,
- établir des règles communes,
- unifier les systèmes d'information pour réduire les coûts,
- établir des centres d'excellence,
- établir des indices de performances simples pour évaluer les contributions des partenaires, et des compétences professionnelles,
- procéder à un reporting à travers toute la chaîne.

(Anderson et al., 1997) en introduit 7 avec une vision client :

- segmenter les clients d'après leur demande,
- personnaliser les réseaux logistiques,
- écouter les signaux de la demande du marché et planifier la production,
- ajuster les produits au plus prêt des besoins des clients,
- être stratégique dans le choix de ses fournisseurs,
- développer une stratégie commune tout au long de la chaîne logistique,
- adopter une mesure de performance commune au sein de toute la chaîne logistique.

### I.3.5 Gestion des stocks

Un des but de la gestion de la chaîne logistique est la satisfaction du client et donc de sa demande.

#### I. 3. 5. 1 Typologie de la demande

La demande peut suivre cinq schémas différents d'après (Courtois et al., 2006).

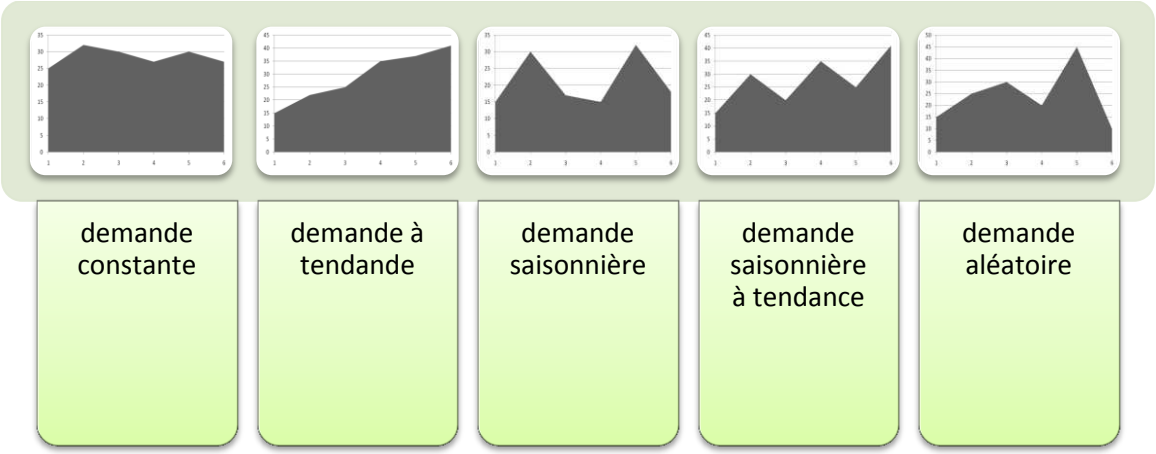



Figure 12 : Cinq types de demande

#### I. 3. 5. 2 Modes de gestion

Selon le type de demande, le mode de gestion est différent (tableau 6).

| **Prédictibilité** | faible | haute |
|---|---|---|
| **Variabilité de la demande** | | |
| Faible | Kanban | OPT |
| Haute | ROP | MRP |

Tableau 6 : Lien entre le type de demande et le mode de gestion (Newman and Sridharan, 1995)

Si la demande est stable et prédictible, le mode de gestion recommandé est la gestion par niveaux de recomplètement des stocks (Re Order Point). La gestion en Optimized Production Technology, elle, se base sur la gestion des goulets et est donc réservée aux productions en grande série avec une faible variété de produits. Enfin, le système MRP est une méthode de gestion et de planification de production en flux poussé (par opposition au Kanban). Pour chaque produit fini, à partir du besoin brut, on obtient le besoin net. Grace à la nomenclature, le nombre de composants nécessaires pour répondre à la prévision des ventes des produits finis est défini.

### I.3.6 Discussion

Parmi les principes de la gestion de la chaîne logistique, nos recherches se focaliseront sur le choix des fournisseurs, l'écoute de la demande finale et l'adoption de mesures de performance communes à l'ensemble de la chaîne.
La gestion des chaînes logistiques possèdent de nombreuses facettes. Nous nous concentrerons sur la gestion des stocks et la conception de la chaîne logistique à travers sa localisation. Pour répondre à la demande finale, l'entreprise a besoin de définir une politique de gestion des stocks (annexe). Pour notre modèle, nous utiliserons la méthode du point de commande afin de répondre aux différentes exigences de notre chaîne logistique que sont la faible variabilité de la demande et la haute prédictibilité.

Mais comme nous l'avons vu précédemment la gestion de la chaîne logistique ne se limite pas à la gestion de stocks. Pour évaluer l'ensemble de la chaîne logistique, des indicateurs de performance doivent être mis en place.

## I. 4. **Performance de la chaîne logistique**

### I.4.1 Définition

Une chaîne logistique est définie comme un réseau global d'organisations qui coopèrent pour réduire les coûts et augmenter la vitesse des flux de matière et d'informations entre les fournisseurs et les clients d'où la notion de performance :

- performance collective (globale de la chaîne logistique) : Pour (Eymery, 2003), la chaîne logistique est inscrite dans un contexte constitué de trois pôles : ses clients, ses fournisseurs, ses opérations internes

- performance individuelle (maximisation du profit d'une entité) (Fénies, Gourgand, 2004). (Lauras, 2004) indique qu'il y a donc des pôles clés : approvisionnement (avec les achats), production et distribution ; le modèle SCOR (Supply Chain Operations Reference) ajoutant la planification. Le modèle SCOR, modèle de référence, a été crée en 1996 par le Supply Chain Council afin d'offrir une méthode de représentation des flux logistiques.

Figure 13 : Modèle SCOR (SCC, 2008)

(Bughin, 2006) souligne ainsi que "la performance ne peut pas se mesurer simplement vis-à-vis de la richesse des actionnaires". (Beamon, 1999) rajoute que mesurer la performance d'une chaîne logistique est très difficile aux vues de la complexité de ses systèmes.

### I.4.2 Indicateurs de la performance

Quelle que soit la performance considérée, il faut nécessairement des indicateurs qu'ils soient financiers ou non financiers pour la mesurer (Morana and Paché, 2003). Grâce à ces indicateurs, un tableau de bord est établi. Pour (Bouquin, 5ème édition 2001), cinq à dix indicateurs suffisent pour un tableau de bord opérationnel ; (Kleijnen and Smits, 2003) rajoute qu'il en faut plus d'un mais que trop rendent la lecture difficile. (Morana and Paché, 2003) a établi une classification des indicateurs possibles. Elle les classe en quatre grandes familles :

- l'organisation et le pilotage,
- la qualité,
- la nature des relations et l'efficacité des procédures de suivi et de contrôle,
- gestion administrative.

Dans la première classe, les indicateurs financiers sont les ratio Inventaire sur niveau de stock d'entrée puis sur les en-cours enfin sur les produits finis en transit ;le temps de cycle total ;le niveau de partenariat fournisseur/acheteur. Dans la seconde classe, ce sont le ratio inventaire sur rebuts et le retour sur investissements. La troisième classe ne comporte pas de critères financiers et la quatrième comporte : bénéfice net versus ratio de productivité, temps de réponse au client.

Pour (Chidambaram, 1999), les mesures de la performance peuvent être : satisfaction des clients, retour sur investissements, part de marché.

Pour (Estampe, 2009), il existe deux catégories d'indicateurs : opérationnelle et stratégique. Le niveau stratégique permet de concevoir la structure du réseau logistique avec une vision marché. Le niveau tactique dimensionne les activités avec une vision client. Enfin, (Genin et al.) ajoutent le niveau opérationnel qui pilote les opérations avec une vision produit.

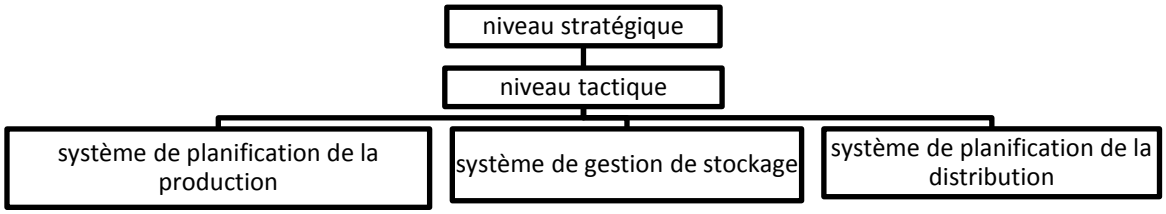



Figure 14: Niveaux des décisions (extrait et adapte de (Shapiro, 2007))

Les travaux de (Gunasekaran et al., 2004), (Gunasekaran and Kobu, 2007), (Barut et al., 2002), (Sahin and Robinson, 2005), (Wu and Song, 2005, De Toni and Nassimbeni, 2001), procèdent à la même classification. (Gruat La Forme-Chrétien 2007) synthétise ces différents travaux dans la figure suivante :

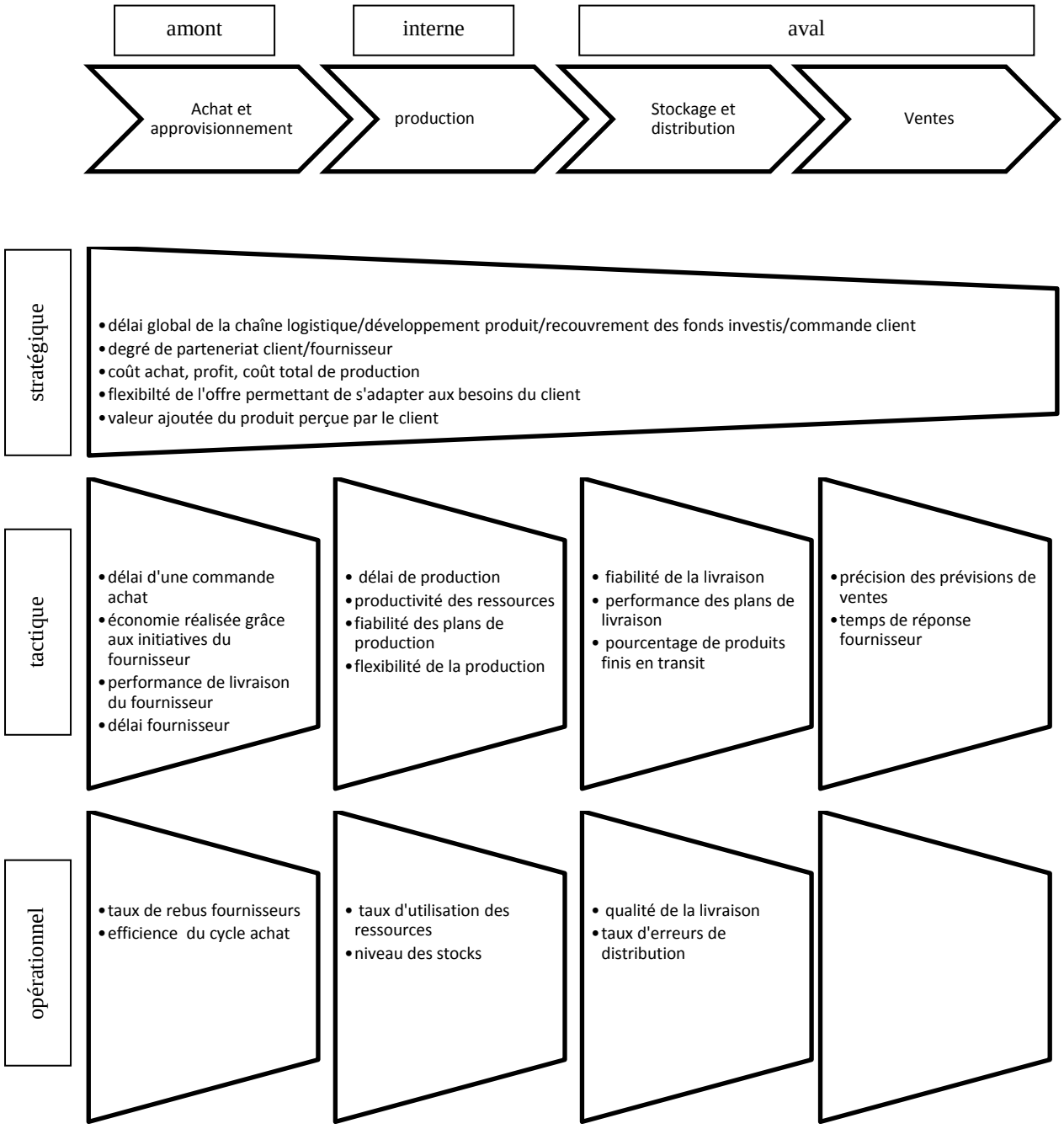



Figure 15 : Indicateurs de performance (Gruat La Forme-Chrétien 2007)

Un autre classement horizontal pourrait être fait selon les coûts, la qualité, la flexibilité et la distribution.

I. 4. 2. 1 Performance des systèmes de production

Une des performances est celle du système industriel lui-même. (Bescos et al., 1995) représente le pilotage de cette performance par la figure suivante :

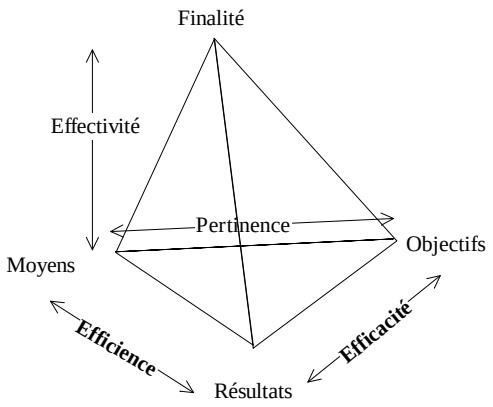



Figure 16 : Pyramide des performances des systèmes de production (Senechal et al., 2003)

(Pellegrin, 2001) donne les mêmes définitions. Parmi ces trois définitions, l'efficacité est mesurée avec le taux de rendement synthétique (TRS). Le temps d'ouverture d'une usine peut être découpé en différents temps. Cette analyse des temps peut être étendue à une chaîne logistique (Camisullis and Giard, 2008). La norme AFNOR 60-182 donne la décomposition suivante :

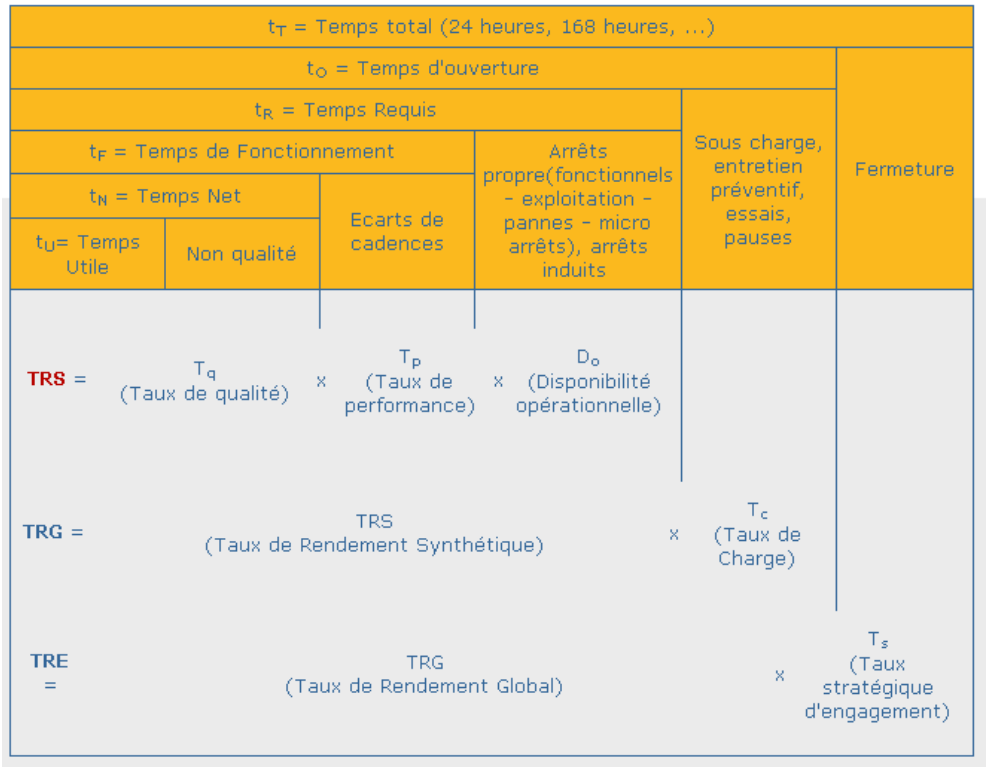



Tableau 7 : Définition du taux de rendement synthétique (AFNOR 60-182)

La norme détaille les temps comme suit :

**temps total $t_T$** : temps de référence intégrant l'ensemble des états possibles du moyen. Pour une journée, le temps total est de 24 h ; pour une semaine, le temps total est de 168 h ; pour un an, le temps total est de 365 jours · 24 h, etc.

**temps d'ouverture $t_O$** : partie du temps total ($t_T$) correspondant à l'amplitude des horaires de travail du moyen de production et incluant les temps d'arrêt de désengagement du moyen de production par exemple (nettoyage, sous charge, modification, essai, formation, réunion, pause, maintenance préventive,…)

**temps requis $t_R$** : partie du temps d'ouverture ($t_O$) pendant lequel l'utilisateur engage son moyen de production avec la volonté de produire comprenant les temps d'arrêt subis et programmés (par exemple pannes, changement de série, réglage, absence de personnel)

**temps d'arrêt propre $t_{AP}$** : partie du temps requis ($t_R$) correspondant au temps d'arrêt imputable au moyen de production.

**temps de panne tP** : partie du temps d'arrêt propre ($t_{AP}$) due à un dysfonctionnement.

**temps d'arrêt d'exploitation tAE** : partie du temps d'arrêt propre ($t_{AP}$) provoquée par l'utilisateur par exemple pour les arrêts de service dus à l'impossibilité du personnel de remplir sa fonction, à des problèmes de qualité,…

**temps d'arrêt fonctionnels $t_{AF}$** : partie programmée du temps d'arrêt propre ($t_{AP}$) qui peut se décomposer en :

- tCOP : Temps de changement d'outil programmé
- tRF : Temps de réglage fréquentiel
- tDC : Temps de contrôle
- tCF : Temps de changement de fabrication
- tEF : Temps d'entretien fréquentiel

**temps de micro arrêt tMA** : partie du temps d'arrêt propre (tAP) constituée de temps d'arrêt difficilement mesurables dont le seuil est défini par l'entreprise

**temps d'arrêt induit tAI** : partie du temps requis ($t_R$) correspondant au temps d'arrêt pendant lequel le moyen de production ne peut accomplir sa fonction pour des causes externes : défaut d'approvisionnement, saturation de pièces, manque de personnel, manque de ressources extérieures, défaut d'énergie.

**temps de fonctionnement $t_F$** : partie du temps requis ($t_R$) pendant lequel le moyen de production produit des pièces bonnes et mauvaises dans le respect ou non du temps de cycle de référence ($t_{CR}$) et avec toutes ou parties des fonctions en service.

**temps net $t_N$** : partie du temps de fonctionnement ($t_E$) pendant lequel le moyen de production aurait produit des pièces bonnes et mauvaises, dans le respect du temps de cycle de référence ($t_{CR}$)

**temps utile $t_U$** : partie du temps net ($t_N$) correspondant au temps non mesurable obtenu en multipliant le nombre de pièces bonnes par le temps de cycle de référence (tCR)

Le TRS est donc défini comme suit :

$$TRS = Disponibilité \times Performance \times Qualité$$

La Disponibilité est quantifiée à partir du temps d'arrêt de production. La Performance est évaluée à partir des pertes de productivité. Enfin, la Qualité est définie en pourcentage de rebuts. Le TRS est un indicateur généralisé, facile à calculer pour les entreprises et offre une évaluation globale du processus de production (Willmott and McCarthy, 2001), (Jonsson and Lesshammar, 1999). De plus, le TRS peut être implémenté facilement comme paramètre de simulation (cadences, pannes, taux de rebuts, temps de réglage). De nombreuses études donnent des niveaux de TRS selon des secteurs industriels variés (Konopka and Trybula, 1996), (Steege, 1996), (Leachman and Hodges, 1997), (Cigolini and Turco, 1997), (Waterson et al., 1999), (Ahmad and Dhafr, 2002), (Wacker and Sheu, 2006),(Muchiri and Pintelon, 2008). Le niveau usuel de TRS est compris entre 45% et 70% pour le secteur mécanique. Les meilleures performances sont de 85%. (Miltenburg, 1995) définit quatre classes d'efficacité pour prendre en compte le niveau de performance du processus de production : infant, industry average, adult et world class.

### I.4.3 Discussion

En exprimant ces classes en terme de TRS, nous avons caractérisé, à partir de la classification de (Miltenburg, 1995), quatre classes d'efficacité. Elles permettront de fixer les paramètres opérationnels de notre modèle tels que les temps de changement de production, temps de pannes, les arrêts autres, les taux de rebuts, etc. Elles répondront ainsi à des indicateurs de performance opérationnels tels que la productivité, les niveaux de stock, le taux de rebut, etc.

Nos résultats en référence à la figure 15 auront un niveau stratégique avec notamment : le délai global de la chaîne, le taux de service, la valeur ajoutée perçue avec l'intégration du développement durable.

## I. 5. **Conclusion**

Nous avons défini ce qu'était une chaîne logistique, ses organisations, ses systèmes de production, de planification et nos choix pour notre modèle. Nous avons également montré comment la gérer et mesurer ses performances. Or, (Christopher, 1992) définit les objectifs de la gestion de la chaîne logistique comme la capacité à créer de la valeur pour le client final sur une chaîne complète allant du fournisseur de dernier rang au client final et où chaque membre de la chaîne participe à cette création de valeur. Pour (Estampe, 2009), le développement durable crée de la valeur aux yeux des acteurs externes de la chaîne logistique que sont les clients, actionnaires et autres parties prenantes. Nous allons effectuer à présent une revue de la littérature du développement durable.

# Chapitre II CONTEXTE CARBONE

II. 1. Changements .....
II.1.1 Changement environnemental .....
II.1.2 Changement économique .....
II.1.3 Changement humain .....
II. 2. Cycle de conférences .....
II.2.1 . Pré Stockholm.....
II.2.2 . Stockholm-World Commission on Environment and Development (WCED) ....
II.2.3 . Post WCED.....
II. 3. Marché carbone européen.....
II.3.1 Emissions d'équivalent $CO_2$ en Europe .....
II.3.2 Taxe ou système d'échanges ?.....
II.3.3 Marché européen .....
II. 4. Autres implications en France .....
II.4.1 Etiquetage carbone .....
II.4.2 Bilan Carbone ® .....
II.4.3 Images des entreprises .....
II. 5. Conclusion .....

La chaîne logistique évolue dans un contexte changeant. Etudions certains de ces changements et leur influence sur la gestion de la chaîne logistique ?

## II. 1. **Changements**

Nous pouvons identifier trois changements différents : environnemental, économique et humain.

### II.1.1 Changement environnemental

En 1827, Fourrier documenté par John Tyndall explique l'effet de serre (figure 17). Puis, (Arrhenius, 1896) est le premier à établir une corrélation entre la température de la terre et la concentration en $CO_2$ dans l'atmosphère.

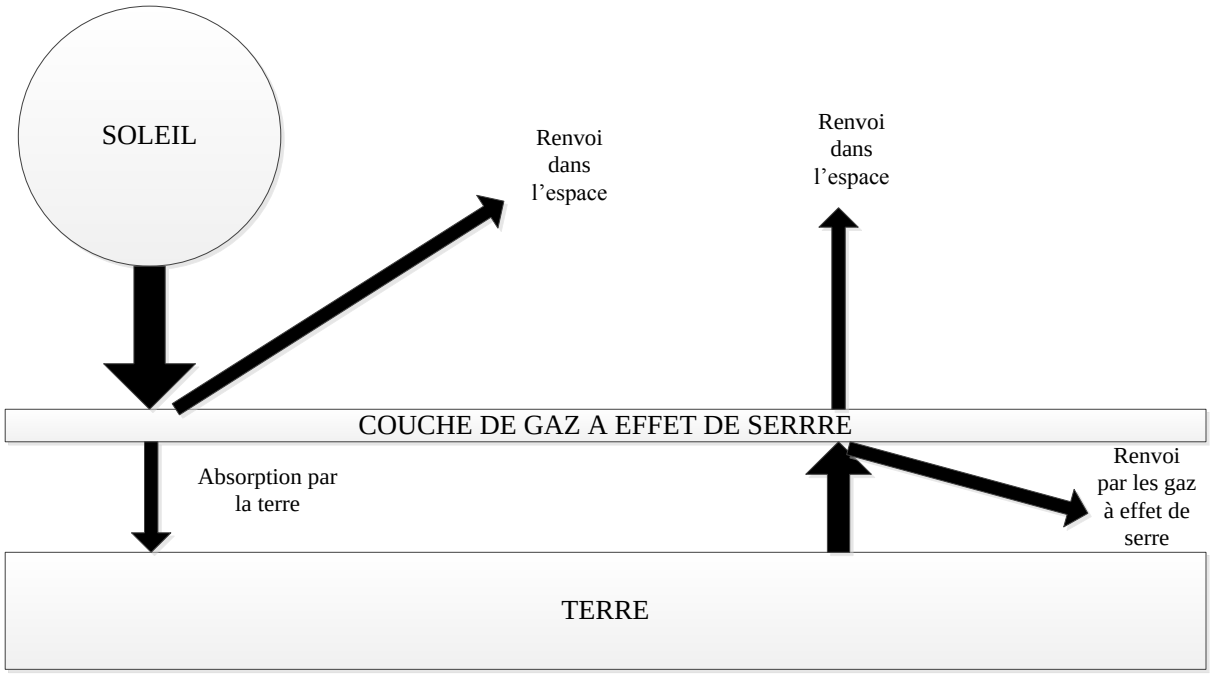



Figure 17 : Représentation de l'effet de serre

Au delà du CO2, d'autres gaz participent à cet effet de serre. Afin d'obtenir une vue globale de l'impact de l'ensemble de ces gaz, un indicateur a été développé : le pouvoir de réchauffement global :

$$PRG = \frac{\int_0^N F_{gaz}(t)dt}{\int_0^N F_{CO_2}(t)dt}$$

AVEC F = Forçage radiatif au cours du temps d'une tonne de gaz émise à l'instant 0. Le forçage radiatif est généralement quantifié comme « le taux de transfert d'énergie par unité surfacique

du globe, mesuré dans les hautes couches de l'atmosphère », et il est exprimé en « watts par mètre carré »(GIEC, 2007b).

Plus la durée choisie est longue plus le calcul est approximatif mais cet indicateur a le mérite de pouvoir servir d'étalon. En effet, le taux de transfert d'énergie est différent selon la composition de l'atmosphère. Or cette composition change avec le temps.

Le tableau ci-dessous récapitule les résultats pour les six gaz à effet de serre du Protocole de Kyoto :

| gaz | PRG relatif à 20 ans | PRG relatif à 100 ans |
|---|---|---|
| **dioxyde de carbone** | 1 | 1 |
| **Méthane** | 72 | 25 |
| **protoxyde d'azote** | 289 | 298 |
| **Hydrofluocarbures** | 440 à 12 000 | 124 à 14 800 |
| **Perfluocarbures** | 2 210 à 8 630 | 7 390 à 12 200 |
| **Chlorofluocarbures** | 5 300 à 11 000 | 4 750 à 14 400 |

Tableau 8 : Forçage radiatif des gaz à effet de serre (GIEC, 2007A)

(Fuglestveddt et al., 2003) définit l'empreinte carbone comme "les mesures d'émissions de gaz à effet de serre directes et indirectes en tonnes d'équivalent CO2 à un horizon de 100 ans". L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) l'utilise pour ses calculs de facteurs d'émissions Bilan Carbone®. Nous emploierons ces facteurs d'émissions pour calculer les émissions d'équivalent $CO_2$ de notre chaîne logistique.

Mais la concentration dans l'atmosphère de ces gaz augmente. Les conséquences positives d'un réchauffement climatique sont la croissance de la biosphère végétale donc l'augmentation de l'absorption de $CO_2$, l'augmentation de la densité des nuages donc la plus grande réverbération des rayons. A contrario, les conséquences négatives sont plus de transpiration animale et végétale, d'évaporation de l'eau donc une augmentation de l'effet de serre liée à la vapeur d'eau. De ce fait, les océans se réchauffent et absorbent moins de $CO_2$.

Ce réchauffement peut suivre trois scénarios d'après (de Perthuis, 2009) :

- une baisse rapide des émissions d'où une augmentation de la température stabilisée en dessous de 2°C

- une stabilité des émissions d'où une augmentation de 2°C à 4°C et une amplification des phénomènes

- une augmentation des émissions d'où une augmentation de plus de 4°C, une nécessité de géo-ingénierie (panneau solaire dans l'espace, stockage carbone, etc.)

Ces scénarios sont impactés par deux autres changements.

### II.1.2 Changement économique

Si l'on considère le contexte économique, deux éléments sont à prendre en compte : le prix du pétrole et celui des produits agricoles.

Le prix élevé du pétrole a trois conséquences :

- la rentabilité des investissements d'exploration. Ainsi, l'industrie pétrolière explore des pistes d'extraction non rentables jusqu'à présent et la question de l'après pétrole recule.
- la répartition hétérogène du pétrole à la surface de la Terre implique des revenus inégaux selon les pays. Ceci renforce l'instabilité politique.
- l'usage du charbon moins cher mais plus polluant est en augmentation dans le monde.

Le prix élevé des produits agricoles engendre, quant à lui, une déforestation plus grande et l'augmentation de l'usage des engrais pour de plus grands rendements.

Ces deux prix élevés risquent d'entraîner donc des émissions supplémentaires. La concentration en gaz à effet de serre dans l'atmosphère augmente et le réchauffement climatique est renforcé. Au-delà de ces changements, il nous faut également prendre en compte le contexte humain.

### II.1.3 Changement humain

(Meadows et al., 2004) indique qu'il y a 8000 ans, la population mondiale explosa pour atteindre les dix millions d'habitants. Pour s'adapter, certains émigrèrent, d'autres se sédentarisèrent. La face de la Terre en fut irrémédiablement changée et les modes de vie également. La location de terre pris un sens et avec elle la notion de troc, d'argent, etc. La notion d'agriculture permis à la population de croître encore plus pour atteindre 800 millions en 1750. Ceci engendra une nouvelle révolution : la révolution industrielle.

De nombreux archéologues s'accordent pour dire que l'effondrement de certaines grandes civilisations anciennes pourrait être dû à une dégradation environnementale. La chute de Rome serait due à une pollution aux métaux lourds (Niragu, 1994). La dégradation environnementale a donc été une force majeure de transformation sociale.

Or, la population connaît aujourd'hui un accroissement très important (environ 7 milliards en 2010) et par la même les émissions de $CO_2$ augmentent. En effet, l'accroissement de ces dernières est anthropique (GIEC, 2007a). Le carbone a deux isotopes stables : 12 et 13. Le premier est le principal isotope présent dans l'atmosphère. Le second est présent en très faible quantité (1,1% du carbone biosphérique). Or, la concentration en carbone 13 dans l'atmosphère diminue alors qu'il y a un accroissement de gaz carbonique. L'isotope instable qu'est le carbone 14 est formé dans la haute atmosphère par bombardement de noyaux d'azote par le rayonnement cosmique secondaire. Il est aussitôt transformé en gaz carbonique et rentre alors dans le cycle du carbone. Or la concentration de cet isotope diminue également. Pour (Jancovici, 2002), il n'y a qu'une seule explication : l'émission anthropique du gaz carbonique par combustion d'énergies fossiles qui contiennent l'isotope 12.

Dans les années 1970, la prise de conscience étatique a donné lieu à une série de conférences mondiales.

## II. 2. **Cycle de conférences**

(Mebratu, 1998) classe les conférences selon trois périodes : avant 1972; de 1972 à 1987 et post 1987. Nous reprenons cette classification à notre compte.

### II.2.1. Pré Stockholm

Cette période constitue la phase de prise de conscience.

Pour (DuBose et al., 1995), l'apparition de technologies avancées tenant compte du niveau de population et de la disponibilité des ressources naturelles ainsi que celui des besoins sociaux définis par la population elle-même sont les précurseurs du développement durable. Mais, la prise de conscience réelle de l'environnement date de 1934 avec un fléau écologique américain. En effet, (Steinbeck, 1972) décrit la catastrophe écologique des années 30 subie par le Midwest américain. Durant une dizaine d'années, des tempêtes de sable, de poussières et la sécheresse sévissent. Les habitants doivent s'exiler.

La prise de conscience sociétale, quant à elle, date de 1948 avec la Déclaration universelle des droits de l'Homme.

Dans la continuité, en 1951, l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature écrit un rapport où elle se préoccupe des liens entre l'économie et l'environnement. Un autre désastre en 1953 à Minatama au Japon dû à la contamination des eaux par du mercure continue d'éveiller les consciences.

En 1961, l'Organisation de Coopération et de Développement Economique (OCDE) et en 1965 le Programme des Nations Unies pour le Développement sont créés. En 1971, le Club de Rome pointe le danger d'une croissance exponentielle face aux ressources naturelles et à leur exploitation et publie " Halte à la croissance"(Meadows et al., 2004). La même année, le Ministère français de la Nature et de l'Environnement voit le jour.

Ceci entraîne un besoin de conceptualisation.

### II.2.2. Stockholm-World Commission on Environment and Development (WCED)

Cette période est celle de la théorisation.

En 1972, c'est le sommet de Stockholm et le rapport de Founex, écrit par Maurice Strong, qui considère que développement et environnement sont les "deux faces d'une même médaille". Trois ans plus tard à Cocoyoc (Mexique), (Ward, 1972) déclare : "La voie à suivre ne passe pas par le désespoir, par la fin du monde, ou par un optimisme béat devant les solutions technologiques successives. Elle passe au contraire par une appréciation méticuleuse, sans passion, des « limites extérieures », par une recherche collective des moyens d'atteindre les « limites intérieures » des droits fondamentaux, par l'édification de structures sociales exprimant ces droits et par tout le patient travail consistant à élaborer des techniques et des styles de développement qui améliorent et préservent notre patrimoine planétaire".

Le terme "écodéveloppement" fait son apparition en 1978 dans un rapport des Nations Unies. En 1985, l'ODCE déclare que "l'environnement est une ressource pour l'avenir". En 1987, le rapport Bruntland introduit la définition de « développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs »

(WCED, 1987). "Sustainable developement" est cité pour la première fois. Sa traduction française ne fait toujours pas l'unanimité : développement soutenable, durable, etc. A partir de là, vient le temps des décisions.

II.2.3. Post WCED

En effet, cette période-ci est celle de la pratique et de la prise de décision. En 1988, le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) est créé et alerte sur les conséquences environnementales des émissions anthropiques de gaz à effet de serre. En 1992, le sommet de Rio de Janeiro (Brésil) débouche sur 27 principes dont les Agenda 21 et différentes conventions. Il donne aussi naissance au triptyque du développement durable :

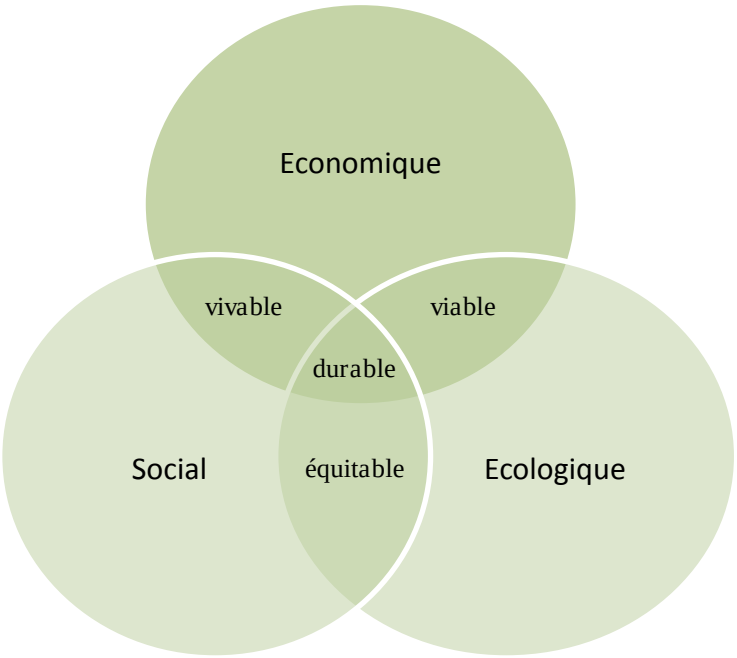



Figure 18 : Développement durable

C'est également l'année de la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changement Climatique (CCNUCC) sur le changement climatique que signent 120 pays. Le protocole de Kyoto en sera l'instrument d'application. Cette convention est au final signée par 192 pays. Elle met en place une gouvernance du risque climatique. Son organe de fonctionnement est le COP (COnférence des Parties) qui doit se réunir une fois par an. Ses trois principes fondateurs sont :

- le principe de précaution : la reconnaissance du réchauffement climatique en lien avec les émissions anthropiques.

Le plafonnement des émissions est décidé mais sans calendrier ni fourchette. Sur ce point (Hansen et al., 2008) préconise un plafond à 450ppm équivalent CO2 maximum alors que (Broecker and Kunzig, 2008) indique 680ppm. En 2005, cette concentration est de 455 ppm équivalent CO2 ce qui représente 30% d'augmentation par rapport à 1990 (année de référence). (Jancovici, 2002) indique que cette concentration augmente de 0.4% chaque année.

- le principe de responsabilité commune mais différenciée : en 1990, les trois quarts des émissions proviennent des pays dits industrialisés. 20% des habitants émettent un peu moins de la moitié des émissions et inversement.
- le principe du droit au développement pour les pays non industrialisés.

En 1995, l'assemblée générale des Nations Unies fait un constat d'échec (baisse des parts de produits nationaux bruts consacrées à l'environnement) et lance le Global Reporting Initiative (rapport environnemental versus rapport financier).

A Kyoto (Japon), en 1997, le traité international d'application de la convention-cadre visant à la réduction des émissions de gaz à effet de serre[3] est signé. Il fait le choix d'une régulation basée sur les quotas d'émissions ouvrant le champ à la finance carbone dont nous parlerons dans la partie suivante. Il donne comme objectif aux pays industrialisés de l'annexe B du protocole (38 pays[4]) une baisse de 5% de leurs émissions entre 2008 et 2012. Au sein de l'Europe, la réduction globale est répartie selon l'économie et le développement des pays. C'est le "partage du fardeau". Mais cette contrainte n'est pas assez forte et la non-ratification des Etats-Unis la rend peu pertinente à l'échelle mondiale. Pour que le protocole puisse entrer en vigueur, il devait être ratifié par plus de 55 pays, totalisant plus de 55 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre. Il est entré en vigueur en 2005 après la ratification de la Russie.

En 1999, à Davos (Suisse), Kofi Annan, secrétaire général de l'ONU, interpelle les entreprises pour qu'elles s'engagent avant même que les pays ne ratifient des accords. En 2000, le GIEC publie une génération de scénarios pour 2100 (figure 19). Pour le scénario le plus optimiste, la concentration en $CO_2$ dans l'atmosphère aura doublé par rapport à l'ère préindustrielle et dans le plus pessimiste elle aura été multipliée par 3,5.

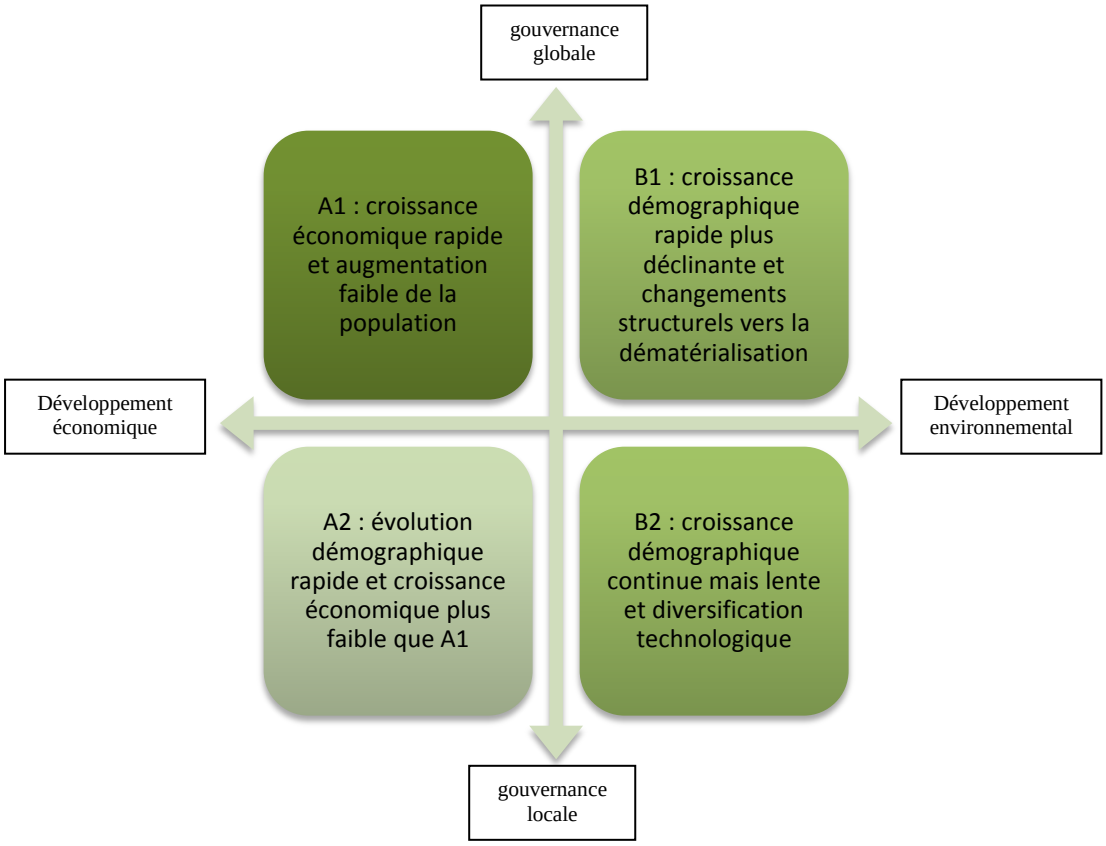



Figure 19 : Quatre scenarios de base pour 2100 adaptes de (GIEC, 2000)

[3] Dioxyde de carbone (CO2), Méthane (CH4), Oxyde nitreux (N2O), Hydrofluorocarbones (HFC), Hydrocarbures perfluorés (PFC), Hexafluorure de soufre (SF6)

[4] Australie, Canada, Croatie, Fédération de Russie, Islande, Japon, Liechtenstein, Norvège, Nouvelle-Zélande, Suisse, Ukraine, 27 pays de l'Union Européenne

En 2001, la France vote la loi sur les Nouvelles Réglementations Economiques (NRE) obligeant les entreprises françaises cotées à rendre compte de leur gestion sociétale et environnementale dans leur rapport d'activités. En dehors de la France, on parle de Corporate Social Responsability soit la responsabilité sociale et environnementale française. En 2002, le sommet de Johannesburg (Afrique du Sud) est le premier sommet mondial sur le développement durable. Il a marqué le désengagement étatique car les états n'ont pas tenu leurs engagements de 1992. A contrario, il a porté les ambitions françaises à travers le discours de (Chirac, 2002): "Notre maison brûle et nous regardons ailleurs. Prenons garde que le 21ème siècle ne devienne pas, pour les générations futures, celui d'un crime contre l'humanité, contre la vie". A l'issue de ce sommet, la France initie une réflexion sur la Charte de l'Environnement qui sera adossée en 2005 à la constitution de 1958. D'après (Mauléon and Silva, 2009), la trilogie du développement durable devient ainsi constitutionnelle. En 2003, en France, le Comité National du Développement Durable est créé. L'article 2 de la « Loi de programme fixant les orientations de la politique énergétique » du 13 juillet 2005 fixe un objectif de « division par quatre des émissions de gaz à effet de serre de la France à l'horizon 2050 ». C'est "le facteur 4". En 2007, le Grenelle de l'Environnement a donné lieu à un ensemble de propositions dont une loi de programme, un projet de loi et des mesures fiscales.

Mais ces décisions doivent avoir des répercutions à la fois sur les entreprises et sur les particuliers. (Castka and Balzarova, 2008) souligne que, par exemple, la diffusion de la norme ISO 26000 ne pourra se faire sans l'appui des gouvernements. Les entreprises n'adopteront cette norme et n'engageront les investissements de changements organisationnels et stratégiques qu'elle implique que si elles perçoivent les bénéfices qu'elles pourront en retirer.

## II. 3. **Marché carbone européen**

### II.3.1 Emissions d'équivalent $CO_2$ en Europe

En 2005, les rejets d'équivalent $CO_2$ sont dus pour 60% aux énergies, pour moins de 30% à l'agriculture et pour environ 10% aux émissions non énergétiques des procédés industriels. Ces dernières sont a priori les plus faciles à contrôler et à changer. En Europe, elles ont baissé de 8 points entre 1990 et 2005. En 2006, pour la combustion d'énergies, 22.8% des émissions sont dues aux transports et 15.4% à l industrie en Europe. En France les pourcentages sont plus élevés : transports (26,5 %), activité industrielle (20,7 %), bâtiments pour le chauffage, la climatisation, la production d'eau chaude sanitaire (18,5 %), production d'énergie (12,7 %), activité agricole (18,6 %) et retraitement des déchets (2,5 %) (Source Mission Interministérielle sur l'Effet de Serre). La figure ci-dessous montre les résultats de l'Europe des 15 par rapport aux objectifs du Protocole de Kyoto.

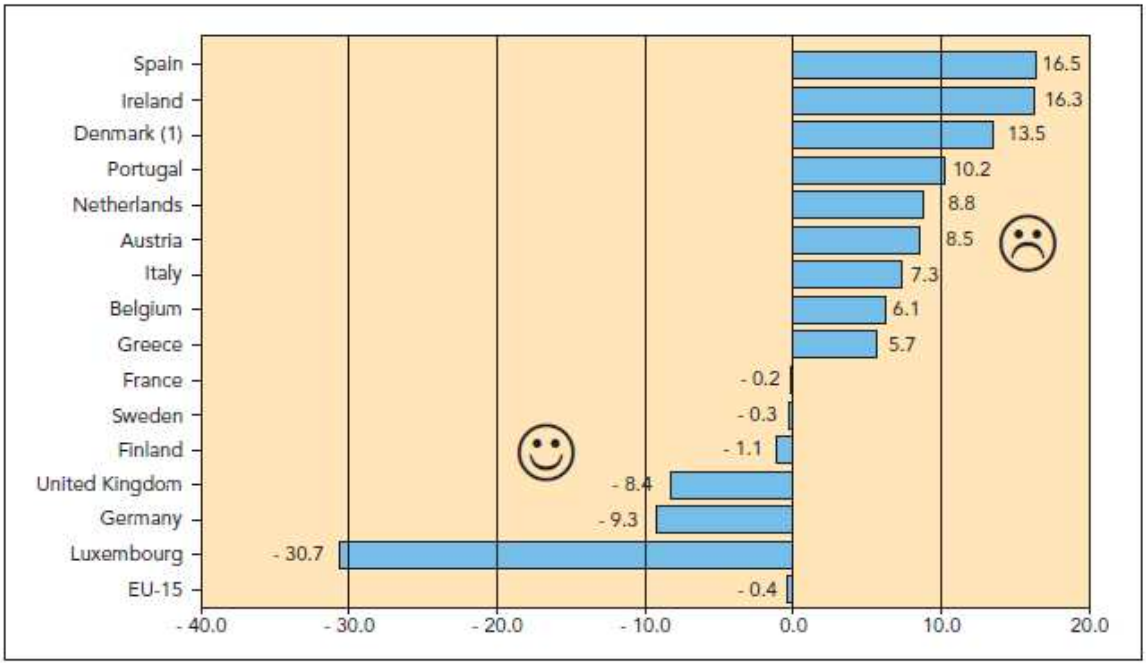



Figure 20 : Résultat des émissions directes de l'Europe des 15 par rapport à l'objectif du Protocole de Kyoto (source : CDC mission cllimat)

## II.3.2 Taxe ou système d'échanges ?

Trois solutions incitatives sont possibles pour diminuer ces émissions :

- une taxe avec redistribution égalitaire (Pigou, 1920),
- la réglementation,
- la création d'un marché développé indépendamment comme pour les émissions de SO2 aux Etats-Unis (Crocker, 1966), (Dales, 1968).

Pour (Faucheux and Joumni, 2005), il peut exister deux sortes de taxes : taxe carbone ou taxe sur l'énergie quelle qu'elle soit. La première a la préférence de la France car elle avantage le nucléaire.

Le système d'échanges, quant à lui, est basé sur les mécanismes du Protocole de Kyoto (De Perthuis, 2008). Il en existe trois :

- mécanisme pour un développement propre (MDP),
- mise en œuvre conjointe (MOC),
- mise en place d'un marché international de crédits carbone.

Chaque pays ayant signé et ratifié le traité reçoit des Unités de Quantité Attribuée (UQA). Celles-ci correspondent aux objectifs d'émissions de gaz à effet de serre imposés par le protocole. Il existe aussi des Unités d'Absorption (UA).Le secrétariat de la CCNUCC a mis en place un registre international des transactions (ITL). Chaque pays doit en créer un et le relier à l'ITL international. Mais en quoi consistent ces mécanismes ?

II. 3. 2. 1 Mécanisme pour un développement propre

Il s'agit de projets hors des pays de l'annexe B de réduction d'émissions donnant lieu à des Unités de Réduction Certifiée des Emissions (URCE). Celles-ci sont approuvées et enregistrées à l'ITL. Elles se concentrent aux trois-quarts en Asie. L'Afrique ne recueille que 5% des projets. Les types de projets sont divers : énergies renouvelables (en particulier énergie hydraulique), réduction de gaz HFC.

II. 3. 2. 2 Mise en œuvre conjointe

Ces projets sont initiés entre deux pays de l'annexe B et donnent lieu à des Unités de Réduction d'Emission (URE) de gaz à effet de serre. C'est un transfert d'unités de réduction. 80% de ces projets concernent la Russie et l'Ukraine dont les émissions sont actuellement très inférieures à celles de l'année 1990 du fait de la récession économique que connaît ces pays. Les types de projet sont principalement du colmatage de canalisations de gaz.

II. 3. 2. 3 Marché international

Il n'existe pas un marché international mais plutôt des marchés internationaux. Nous les avons représenté en figure 21 :

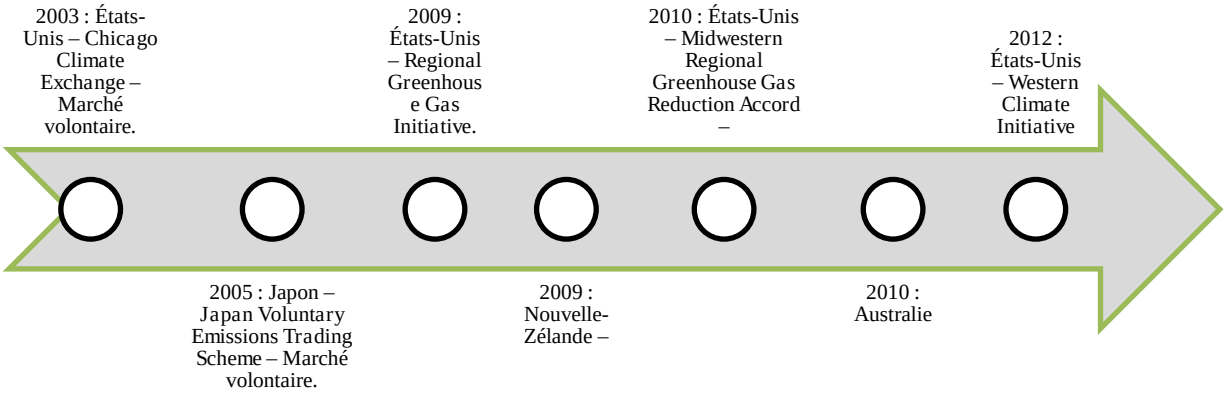



Figure 21 : Chronologie des marchés Carbone hors Europe

Ces marchés ne sont pas à négliger. Pour (De Perthuis, 2008), ce sont des instruments économiques mais sans engagements gouvernementaux de plafonnements, ils ne suffiront pas. Malgré ses défauts, le marché européen est, quant à lui, devenu un marché de référence et servira de base à un marché mondial (Ellerman et al., 2010). Or pour (Delbosc and De Perthuis, 2009) ce marché est une priorité afin d'inclure dans les quotas les émissions dues à l'agriculture et à la déforestation. Cette dernière est la principale source de nombreux pays en voie de développement. (Chladná, 2007) montre que le prix du carbone devrait être élevé pour que les acteurs de ce secteur s'impliquent. De plus, l'augmentation des acteurs diminuerait la possibilité de manipulation des prix de quotas (Delbosc and De Perthuis, 2009).

### II.3.3 Marché européen

Le marché européen représente 80% des échanges mondiaux avec six bourses dont Paris (Bluenext) pour le marché au comptant[5] et Londres (ECX) pour les contrats à terme[6]. Il s'y échange des Quotas d'Emissions EuropéenS (QEES) pendant européen des UQA. C'est ce que (Diakhate, 2006) appelle la "bulle européenne" avec la directive 2003/87/EC.

Le marché débute en 2008 : European Union Emissions Trading Scheme. Il est très virtuel car il n'y a que très peu de transactions et le prix n'est pas significatif. Il existe trois sortes de transactions (Ellerman et al., 2010) :

- bilatérales : sans intermédiaire mais il faut un très haut niveau de connaissance du marché. Ce sont donc des transactions importantes réalisées par de grands groupes énergétiques.
- de gré à gré : par intermédiaire. Elles représentent plus de 70% des transactions.
- organisées : elles fonctionnent sur des plages horaires et selon un mode d'échanges en continu.

Ce marché a comme motivateurs : les compensations obligatoires dus aux objectifs de Kyoto et les compensations volontaires. Les acteurs de la compensation sont les suivants :

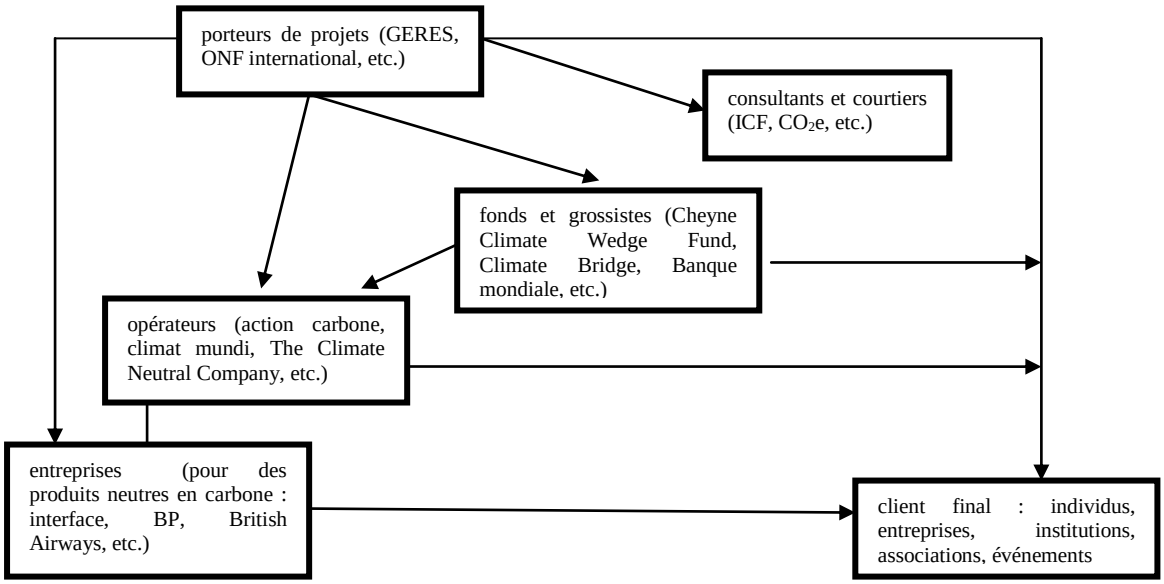



Figure 22 : Acteurs de la compensation (Bellasen and Leguet, 2008)

#### II. 3. 3. 1 Compensations obligatoires

11 000 installations industrielles européennes sont assujetties à la directive européenne des quotas d'émissions qui fait suite au Protocole de Kyoto dont 50% pour l'électricité, raffineurs, producteurs de chaleur, sidérurgie, ciment, verre… et ces installations émettent 45% des

[5] Marché au comptant : la livraison et le paiement des biens échangés ont lieu simultanément et immédiatement
[6] Contrats à terme : engagement ferme de livraison dont les caractéristiques sont connues à l'avance : quantité, échéance

émissions européennes totales. De plus, l'Europe s'est engagé à diminuer ses émissions de 20% d'ici 2020 voire 30% s'il y a un accord international.

Le marché des compensations obligatoires est mis en place en trois phases :

- 2005-2008 : les quotas sont d'abord entièrement gratuits. C'est une phase d'expérience. Le système fonctionne mais les quotas doivent êtres ajustés car leur surplus entraîne un prix de marché vers zéro (figure 23). 2200 millions de quotas alloués chaque année durant la première période; puis seulement 2100 millions durant la seconde. De plus, les prix n'augmenteront pas tant que les projets de Kyoto resteront plus chers que les réductions directes. Dans une deuxième phase, les prix se sont stabilisés (figure 23). Les prix élevés de 2005-006 ont incité des émetteurs à réduire leurs émissions.

1 : volatilité élevée : choc sur les prix en avril-mai 2006
2 : prix converge vers zéro : surplus de quotas et absence de bancabilité entre périodes
3 : prix plus élevés : anticipation des déficits suite aux décisions de la commission européenne sur les PNAQ 2 et aux engagements du conseil européen

Figure 23 : Prix volatil (Mission Climat de la Caisse des Dépôts, 2008)

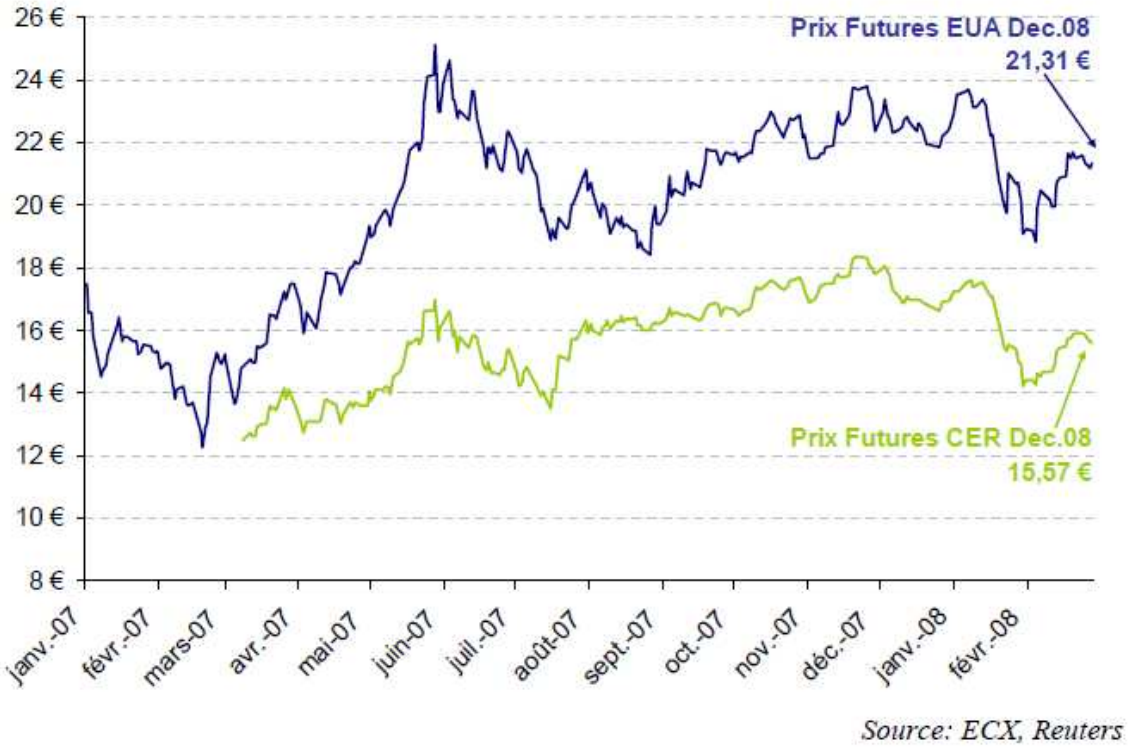



Figure 24 : Prix des quotas Kyoto et européen

- 2008-2012 : dans 13% des cas, les échanges sont dus à des projets de réduction d'émissions de Kyoto. Pour le marché européen, les quotas payants représentent 3% du total. Ceci confère une valeur à un bien gratuit : c'est le principe anglo-saxon de "cap and trade". Le carbone a donc un prix. En fin de deuxième période, 50% des émissions européennes sont concernés par les quotas.
- 2013-2020 : enchères (plus de gratuité) et entrée des entreprises de transports aériens, d'aluminium et de chimie.

Un registre comptabilise chaque quota et une pénalité de 100€ par tonne est appliquée en cas de non restitution depuis 2008.

### II. 3. 3. 2 Compensation volontaire

D'après (Bellasen and Leguet, 2008), la compensation volontaire consiste à réduire ailleurs les émissions qu'on ne peut pas réduire, au jour d'aujourd'hui, dans son propre périmètre. 70% de la compensation volontaire est effectuée par les entreprises. Cette compensation est l'objet de projet d'efficacité énergétique et substitution à 39% et d'installation d'énergies renouvelables à 24% d'après la banque mondiale en 2007. L'exemple type est un gros projet chinois, indien ou brésilien de destruction de gaz industriel. Les projets sont plus diversifiés que les projets liés au protocole de Kyoto.

Le marché est très organisé avec des porteurs de projets, des courtiers, des opérateurs, des entreprises pour des produits "neutres en carbone" et des clients finaux. Mais ce marché est

sujet à de nombreuses fraudes notamment à cause de l'additionnalité environnementale[7]. Or, (Bellasen and Leguet, 2007) montre que plus la demande est basse plus le problème de l'additionnalité est fort. Des labels sont donc mis en place comme celui de l'ADEME permettant un certain suivi de la démarche de ces projets.

Figure 25 : Logo de compensation carbone de l'ademe

## II. 4. **Autres implications en France**

### II.4.1 Etiquetage carbone

Suite au Grenelle de l'Environnement, une réglementation concernant les produits mis en vente par la grande distribution se met en place pour promouvoir l'étiquetage environnemental et en particulier carbone. (Bernard, 2009) a réalisé une étude sur les effets d'un étiquetage carbone sur les consommateurs. Il prend comme exemple le projet d'étiquetage de Casino (figure 26) et en conclut avec précaution car son étude à de nombreuses limites :

- que les consommateurs achèteraient préférentiellement des produits moins émetteurs,
- que les consommateurs souhaitent un label extérieur à l'entreprise.

Figure 26 : Etiquetage casino

Figure 27 : Etapes prises en compte dans le calcul de l'indice carbone

[7] Garantie que le projet financé génère effectivement une baisse d'émissions de gaz à effet de serre par rapport aux activités qui auraient été menées en l'absence de celui-ci (scénario de référence dit « business as usual »). Un projet qui remplit ces conditions est qualifié d'« additionnel » (ADEME)

### II.4.2 Bilan Carbone ®

En 2011, "les entreprises de plus de 500 salariés, les personnes morales de droit public de plus de 250 personnes et les collectivités territoriales de plus de 50.000 habitants devront réaliser un bilan des émissions de gaz à effet de serre destiné à réduire la consommation énergétique et favoriser le recours aux énergies renouvelables" d'après l'avant-projet du Grenelle II.

Le bilan carbone ® est une méthode proposée par l'ADEME afin de quantifier les émissions de gaz à effet de serre engendrées par les activités directes et indirectes d'une organisation.

### II.4.3 Images des entreprises

L'entreprise est également impactée au niveau de son image par l'éveil des populations au développement durable :

- (Gruau, 2009) montre que Samas France, en conduisant une politique de relocalisation, a doublé ses ventes.
- (Houe and Grabot, 2009) indique qu'un éco-label est un véritable avantage pour les entreprises.
- l'étude de (Raux et al., 2007) conclut que les donneurs d'ordre sont de plus en plus sensibles au bilan environnemental de leur transport de fret car l'image verte de leur société est très importante.

Enfin, une étude d'(Accenture, 2007) auprès de 100 entreprises françaises montre que pour 47% d'entre-elles le développement durable est un critère de différenciation pérenne, que 64% de leurs clients sont demandeurs. De plus, pour ces entreprises, ces attitudes seront à 54% de plus en plus vrai. Elles sont 70% à penser que leurs initiatives dans ce domaine génèrent de la valeur financière.

## II. 5. **Conclusion**

Ce chapitre montre que depuis la prise de conscience de l'environnement en 1934 et de l'aspect sociétal en 1948, un long chemin a été parcouru. Un deuxième pas a été franchi avec la conceptualisation du développement durable; puis un troisième avec l'implication des Etats, au niveau mondial et local, et la mise en place progressive de différents outils de réglementation. Si nous nous intéressons plus particulièrement au volet environnemental du développement durable, nous voyons que les entreprises sont de plus en plus poussées à en tenir compte par leurs clients, leurs actionnaires, les états. Le contexte carbone a notamment de plus en plus d'implications pour les entreprises. Nous allons présenter les recherches actuellement menées dans ce sens pour la chaîne logistique.

# Chapitre III CHAINE LOGISTIQUE VERTE

III. 1. Chaîne logistique verte .....
III.1.1 Contexte .....
III.1.2 Définition .....
III. 2. Gestion de la chaîne logistique verte .....
III.2.1 Définition .....
III.2.2 Historique des travaux de recherches .....
III. 3. Performance .....
III.3.1 Performance environnementale .....
III.3.2 Lien entre performances financière et environnementale .....
III.3.3 Lien entre émissions de carbone et performance financière .....
III.3.4 Indicateurs .....
III.3.5 Discussion .....
III. 4. Etude des émissions de carbone le long d'une chaîne logistique .....
III. 5. Conclusion .....

# III. 1. **Chaîne logistique verte**

## III.1.1 Contexte

L'environnement n'est plus seulement l'affaire des organisations à but non lucratif. Sa prise en compte par l'industrie permet d'accroître les profits (Srivastava, 2007). Les entreprises sont donc poussées à adopter des mesures environnementales (Vachon, 2007, Zhang et al., 2007) par :

- leurs clients

(Zhu and Geng, 2001) citent les chiffres suivants : dans certaines villes chinoises comme Dalian, 83,4% des personnes préfèrent acheter des produits verts, 72,5% seraient prêtes à payer plus cher pour cela ; Aux Etats-Unis, ces chiffres passent à 75% et 80% (Carter et al., 2000). D'un autre côté, (Robinson and Wilcox, 2008) indique que 91% des entreprises évaluent leurs fournisseurs sur des critères verts. A compétence égale, cela devient donc un facteur de différenciation.

- leurs actionnaires

On peut citer la loi numéro 2001-420 du 15 mai 2001 relative aux nouvelles régulations économiques qui oblige les entreprises cotées en bourse à inclure dans leur rapport annuel des informations concernant les conséquences sociales et environnementales de leurs activités. Dans cette optique, le Dow Jones Sustainability Index a été créé et prend en compte les conduites durables.

- et les états (Zhang et al., 2007)

On peut également citer des normes : l'ISO 14000 par exemple qui regroupe ce que « l'organisme fait pour réduire au minimum les effets dommageables de ses activités sur l'environnement, et améliorer en permanence sa performance environnementale. » (Arsham, 2000)(Arsham, 2000)(Arsham, 2000)(Arsham, 2000)(Arsham, 2000)(Arsham, 2000)

Notre étude a pour but d'aider les responsables de chaîne logistique à rendre leur chaîne logistique plus performante d'un point de vue environnemental.

## III.1.2 Définition

La chaîne logistique verte renvoie aux différentes méthodes que met en place chaque entreprise avec ses fournisseurs et ses clients pour améliorer leur performance environnementale ce qui va au delà de la logistique inverse (Lu et al., 2007a). Pour (Zhang et al., 2007) la chaîne logistique verte qu'il nomme durable comporte les trois aspects du développement durable : social, écologique et économique.

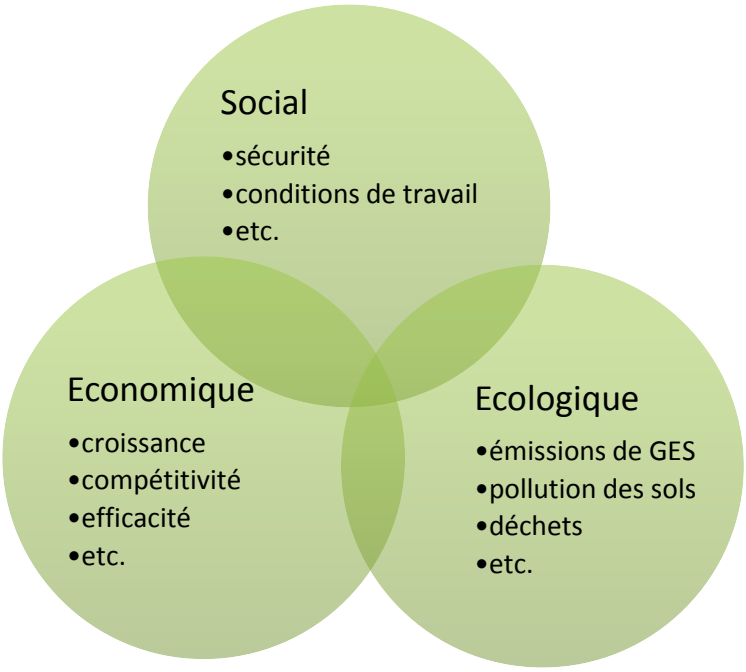



Figure 28 : Logistique durable (Pan 2010)

Cette transposition du développement durable dans l'entreprise se traduit par la triple bottom line (People, Planet, Profit) (Elkington (1999). C'est une allusion à la dernière ligne du bilan (résultat net). Qui dit performance, dit également création de valeur qui peut être directement financière mais aussi indirectement financière (image de marque, etc.).

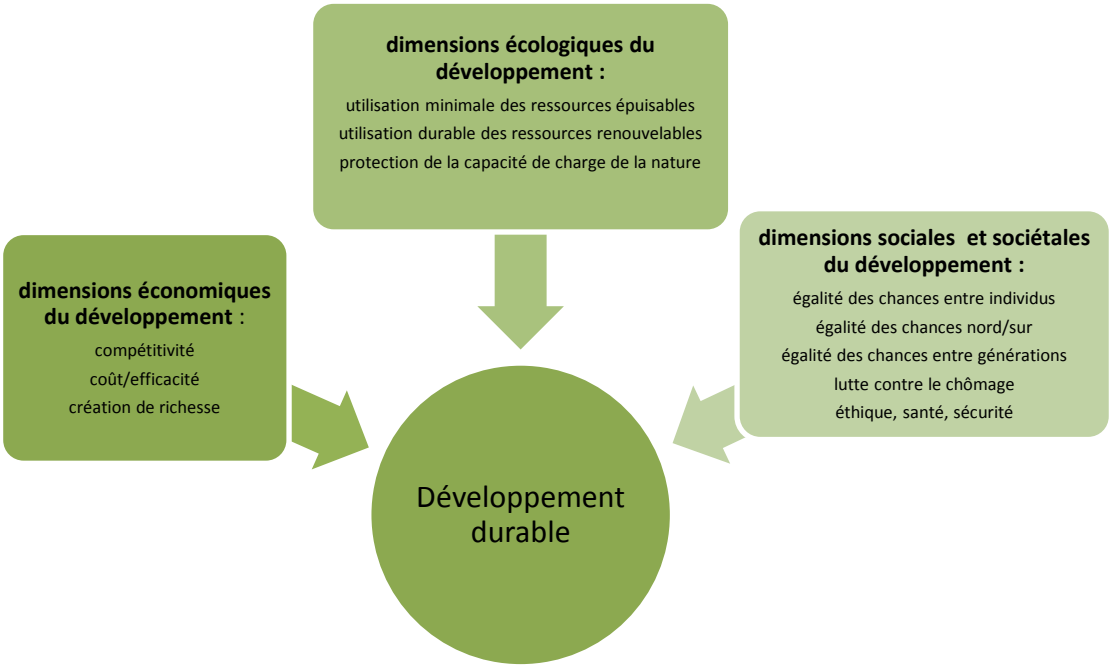



Figure 29 : "triple bottom line"(Guyonnaud and Willard, 2004)

La gestion de la chaîne logistique a donc dû s'adapter à cette nouvelle dimension.

## III. 2. **Gestion de la chaîne logistique verte**

### III.2.1 Définition

Selon (Lu et al., 2007b), la gestion de la chaîne logistique verte passe par la définition de critères environnementaux constants et poursuit deux objectifs :

- promouvoir une attitude environnementale responsable le long de la chaîne logistique

- aider les fournisseurs à reconnaître l'importance de résoudre les problèmes environnementaux et les aider dans leurs initiatives

Ces deux objectifs donnent naissance à la définition suivante (Bloemhof-Ruwaard et al., 1995).

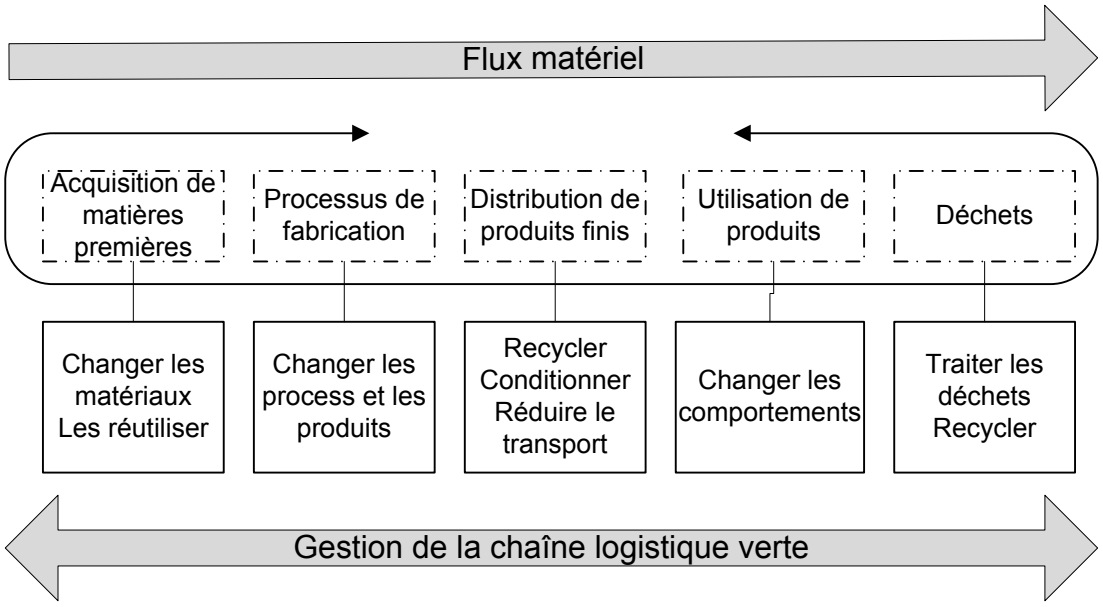



Figure 30 : Gestion de la chaîne logistique durable

### III.2.2 Historique des travaux de recherches

(Sarkis et al., 2011) effectuent une revue de littérature de la gestion de la chaîne logistique verte : les premiers travaux datent de 1969 et l'argumentation invoque déjà des émissions de GES (Ayres and Kneese, 1969). Ils traitent des flux de matières. A partir des années 80, la revue historique d'(Erkman, 1997) indique que les recherches se concentrent sur l'analyse du cycle de vie des produits. A la fin des années 80, le double aspect économique et environnemental est traité. La gestion de la chaîne logistique verte est enfin vue comme stratégique (Bhote, 1989).

(Thomas and Griffin, 1996) rajoute que depuis 1996 et la norme ISO 14001, les entreprises sont fortement incitées à porter attention au volet environnemental mais que dans un premier temps elles ont amélioré le design et la composition de leur produit.

D'après la revue de (Srivastava, 2007), depuis le début des années 90 jusqu'en 2005 : 14 travaux concernent la gestion des déchets, 22 la logistique inverse, 21 la fabrication et le

recyclage, 16 la conception et 20 la gestion de la chaîne logistique verte. Il distingue également deux types de recherche :

- la conception des produits (Kuo et al., 2001),

- le côté opérationnel. Dans ce dernier, nous pouvons lister : la production, le réassemblage (Sheu et al., 2005), la logistique inverse, la conception de la chaîne logistique (Fleischmann et al., 2001, Zhu et al., 2008), la gestion des déchets (Bloemhof-Ruwaard et al., 1996, Cheng et al., 2003).

A travers une revue des 191 articles de 1994 à 2007 concernant le terme Sustainable Supply Chain (SSC), (Seuring and Müller, 2008) trouvent que près de 90% des études analysées discutent des problèmes environnementaux. Parmi ces sujets, (Thomas and Griffin, 1996) indiquent que le terme « green » s'est accru dans les publications mais que la plupart des travaux sont basés sur la logistique des retours (Reverse Logistics) et le système de recyclage (Bostel et al., 2005), le transport ayant reçu relativement moins d'attention sur cette période.

(Wang et al., 2011), quant à eux, étudient la chaîne logistique avec comme focus principaux le transport et la manutention. A travers leur modèle, ils tentent de minimiser le coût total et l'influence environnementale de leur chaîne. Ils concluent que garder une grande flexibilité dans les livraisons grâce au stockage est bénéfique pour l'environnement. Ils rajoutent que plus la demande est grande, plus il sera avantageux d'investir davantage dans la protection de l'environnement. En effet, pour eux, plus la demande est forte, plus le prix pour le produit fabriqué peut être grand. Les entreprises n'ont alors pas besoin d'aller chercher des fournisseurs lointains mais moins chers.

(Beamon, 2005) aborde la "gestion de la chaîne logistique consciente de l'environnement". Mais, pour lui, il y a un réel manque de travaux de recherches ayant pour but d'aider les ingénieurs à prendre des décisions quel que soit leur niveau. Déjà en 1996, (Lamming and Hampson, 1996) indiquaient que, dans l'immédiat, le principal défi pour les professionnels de la chaîne logistique était de transformer les facteurs environnementaux clés en succès financiers. Pour cela, il est nécessaire de leur fournir des guides d'aide à la décision.

Pour comparer les chaînes logistiques, nous devons mesurer leur performance respective.

## III. 3. **Performance**

### III.3.1 Performance environnementale

(Wu and Dunn, 1995) indique que chaque élément de la chaîne de valeur doit être impliqué dans la recherche de performance environnementale. La figure 31 montre bien que au delà du contrôle de la qualité puis de la gestion de la qualité totale se situe la gestion environnementale de cette dernière. Elle prend en compte l'environnement et les autres parties prenantes. (Wilkerson, 2005) précise que la gestion environnementale est un conducteur de valeur commerciale et non un centre de profits.

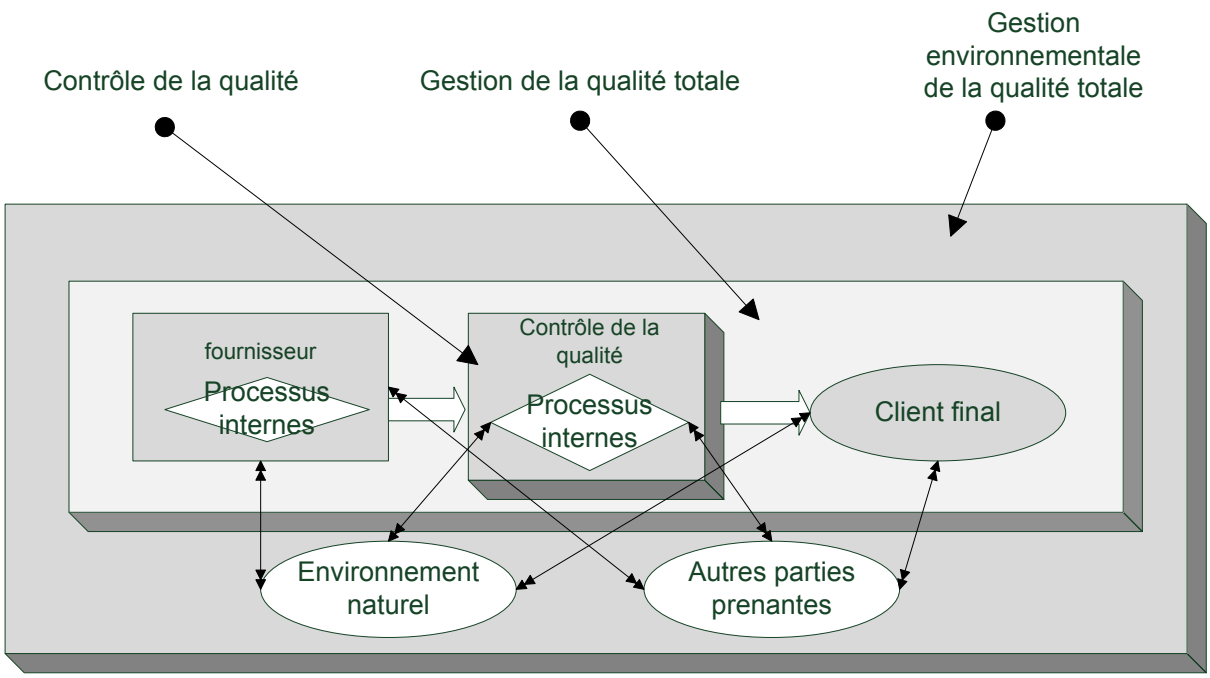



Figure 31 : Gestion environnementale de la qualité totale (Corbett and Klassen, 2006)

### III.3.2 Lien entre performances financière et environnementale

Les entreprises sont donc de plus en plus poussées par leurs clients, leurs actionnaires et les états à adopter des mesures environnementales (Akono and Fernandes, 2009). Elles sont prêtes à mettre en place une politique de développement durable si elles ont la preuve que leurs bénéfices seront accrus par ce choix (Bowen et al., 2001). Dès lors, un des sujets les plus importants dans la littérature est la question de la compatibilité entre le développement durable et la croissance économique (de Brito et al., 2008), (Kainuma and Tawara, 2006, Lamming and Hampson, 1996). (Dyllick, 2002) indique que le nombre d'articles sur ce sujet croit. Ainsi, pour (Carter and Rogers, 2008), il existe un lien entre performances environnementale et économique voire sociétale. De plus, plusieurs auteurs montrent de manière empirique que ce lien est positif (King A. and Lenox M., 2001), (Klassen R-D and McLaughlin C., 1996), (Porter M. E. and Van der Linde C., 1995), (Murphy, 2002). (Derwall et al., 2005) montrent même que le bénéfice d'un investissement durable peut être substantiel. D’autres articles établissent une relation entre initiatives vertes et augmentation de la compétitivité mais n’ont pas assez de preuves pour en mesurer l’importance (Rao and Holt, 2005), (Kiernan, 2001a). (Zhu and Sarkis, 2004) trouvent que les pratiques de la gestion verte de la chaîne logistique donne une relation 50/50 entre performances environnementale et économique.

La chaîne logistique peut être impactée de différentes manières : la réduction des gaspillages entraînerait des gains de productivité et une baisse des coûts de production, un label vert entraînerait une augmentation des ventes, etc. Les études de (Derwall et al., 2005) et (Kiernan, 2001b) le confirment. (Ferretti et al., 2007) évaluent les effets économiques (rebuts, stocks, etc.) et environnementaux dans une chaîne logistique d'aluminium liquide. Pour eux, si l'investissement vert engendre un gain financier, cette combinaison n'est pas infinie. La courbe liant les deux est asymptotique.

(Chien and Shih, 2007) résument ainsi les implications de la gestion de la chaîne logistique verte :

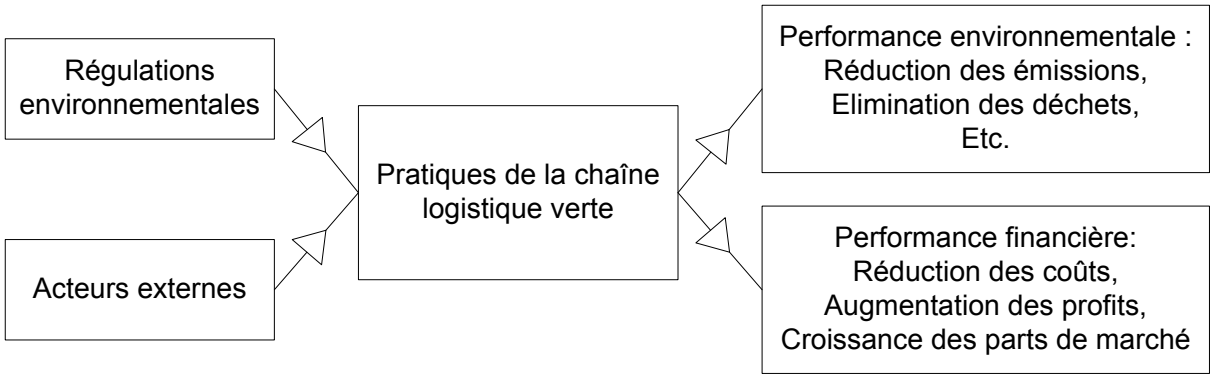



Figure 32 : Implications de la gestion de la chaîne logistique verte

Enfin, (Larson et al., 2000) appliquent la théorie de la "destruction créatrice" de Schumpeter (1883-1950) en expliquant que les entreprises, obligées d'adopter le développement durable, deviennent plus entreprenantes et innovantes.

### III.3.3 Lien entre émissions de carbone et performance financière

Parmi les indicateurs de performance environnementale, nous trouvons les émissions de carbone (figure 32). Or, leur réduction est un objectif important de la logistique durable en cohérence avec la logique du « Facteur 4 ». Pour (Mahoney, 2008), identifier les sources de carbone dans une chaîne logistique devient donc une nécessité. (Sundarakani et al., 2010) rajoutent que les émissions le long de la chaîne logistique sont un élément crucial à prendre en compte. (Busch and Hoffmann, 2007) définissent un contexte carbone très présent autour de la chaîne logistique. Les contraintes sont de natures différentes :

- les matières premières avec notamment les énergies fossiles,
- la conception des produits (choix des matières premières, du mode de fabrication, etc.)
- les implications du Protocole de Kyoto, de la taxe carbone,
- le changement de comportement du consommateur, etc.

Les recherches dans ce domaine sont donc complexes et importantes. Une étude de (Vachon and Mao, 2008) montre que la performance industrielle d'une chaîne logistique et un niveau faible d'émissions de gaz à effet de serre (principalement le $CO_2$) sont positivement liés. Dans l'industrie de l'aluminium, (Chaabane et al., 2010) concluent qu'une gestion efficace des émissions de carbone aide les décideurs à accroître leur rentabilité grâce à l'atteinte de leurs objectifs verts.

Pour mesurer cette performance, nous avons besoin d'indicateurs.

### III.3.4 Indicateurs

Pour évaluer la performance environnementale, des indicateurs verts ont été étudiés (Brent and Visser, 2005), (Siracusa G., 2004) mais pour (Lu et al., 2007b), il est impossible de considérer tous les facteurs environnementaux dans une même étude car ils sont trop nombreux. (Veleva and Ellenbecker, 2001) en dénombre 22 dont :

- (Scherpereel et al., 2001) étudient la pertinence d'une sélection d'indicateurs de performance environnementale : qualité de l'eau, émissions gazeuses, déchets solides, déchets toxiques, nuisances locales, consommation d'eau, consommation de matière première et d'emballages.
- (Lu et al., 2007a) citent comme critères environnementaux : gaspillage de matières premières, utilisation de l'énergie, résidus solides, résidus liquides, résidus gazeux. L'étude de (Zhu and Geng, 2001) montre que les bénéfices les plus importants incluent la réduction du gaspillage des matières premières, des coûts de transports et des coûts d'élimination des déchets.
- (Tsoulfas and Pappis, 2008) donnent comme indicateurs pour la supply chain : consommation d'eau, d'énergie, type d'énergie, eau réutilisée, % de matériaux réutilisés, taux de réutlisation, déassemblement, taux de défectueux, taux de défectueux réutilisé, déchets de production, biodégradabilité des produits.
- (Olsthoorn et al., 2001) réalisent une revue des indicateurs et propose notamment les suivants : production physique, quantités financières, nombre d'employés pour les indicateurs financiers et contribution au GES, pollution de l'eau pour les environnementaux.
- (Mosovsky et al., 2000) ont développé un outil de mesure environnementale : Eco Pro. Eco pour ECO-efficience et Pro pour PROductivité. Il quantifie les impacts environnementaux, la productivité, l'écoefficience d'une entreprise, son emplacement et le niveau de ses produits.
- Dans leur modèle de future chaîne logistique, Cap Gemini se sert des paramètres suivants (2008a) : réduction des coûts (stock, manutention, transport), émissions de CO2, congestion du trafic, simplification des infrastructures. (Rizet and Keïta, 2005) et (Cholette and Venkat, 2009) montre en effet que le transport et le stockage compteraient pour 50% dans l'impact environnemental d'une chaîne logistique.

De plus, (Saling P. et al., 2002) ont mené une analyse d'éco-efficience. Pour le WBCSD, l'éco-efficience a pour objectif de faire produire mieux en réduisant les impacts sur l'environnement. C'est une mesure relative : $\frac{valeur\ du\ produit\ ou\ service}{impact\ environnemental}$. Un exemple serait : $\frac{nombre\ de\ produits\ vendus}{émissions\ de\ carbone}$ (WBCSD, 2000, Hammond et al., 1995). Dans leur étude, ils indiquent que les trois principaux facteurs sont les émissions et les consommations d'énergie et de matières premières (approximativement 20% chacun). De plus, parmi les émissions, les émissions atmosphériques comptent pour 50%. Pour celles-ci, le $CO_2$, gaz à effet de serre, est la mesure de référence. Selon le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC), le principal problème auquel la planète doit et devra faire face est le réchauffement climatique résultant de l'augmentation des émissions d'équivalent CO2 (Soytas and Sari, 2009). Pour (Foran et al., 2005) justement, les aspects financiers peuvent être exprimés en dollars de gains d'exports par dollar investi ; les aspects sociaux en minutes de travail généré pour un dollar investi ; l'aspect environnemental en kilogramme de dioxyde de carbone émis pour un dollar.

### III.3.5 Discussion

L'état de l'art, ci-dessus, nous montre qu'il y a un manque de travaux pouvant servir d'aide à la décision pour les entreprises. Les bénéfices notamment financiers d'une chaîne logistique verte ont été prouvés. Cependant, les émissions font partie des éléments à étudier plus précisément pour mieux quantifier l'intérêt d'intégrer le développement durable dans une chaîne logistique. Nous avons vu au chapitre 2 l'importance que prenait le contexte carbone.

Pour cela, nous nous focalisons sur les émissions d'équivalent carbone, gaz de référence. (Vachon and Mao, 2008) fait aussi le constat d'une augmentation de la performance industrielle en cas de diminution des émissions. Mais quelles émissions étudier ? Le transport et le stockage représentent 50% de l'impact environnemental d'une chaîne logistique. Notre recherche se concentre donc sur les émissions d'équivalent $CO_2$ dues au transport et au stockage le long d'une chaîne logistique.

## III. 4. **Etude des émissions de carbone le long d'une chaîne logistique**

Très peu d'articles ont été rédigés sur ce sujet. Nous en avons relevé trois qui portent exclusivement sur les émissions d'équivalent $CO_2$ :

1. (Sundarakani et al., 2010) utilisent les modèles de transport eulérien et lagrangien pour calculer les émissions d'équivalent $CO_2$. Leurs données d'entrée sont les vitesses de dépôt, facteur de résistance, vitesse de friction, poids de dépôts sec, humide, etc. Les résultats sont donnés en kWh. Une des hypothèses de départ est : les émissions dues au transport et au stockage sont les plus importantes. Leur modèle théorique est ensuite appliqué à un exemple numérique pour le valider.

Les hypothèses de départ confirment les nôtres mais la méthode est très différente. Il s'agit ici de calculer de manière très précise les émissions dans un exemple très spécifique.

2. (Chaabane et al., 2010) étudient les conséquences des prix du carbone sur la chaîne logistique à partir d'un modèle mathématique. Pour eux, la vente et l'achat de crédits carbone fait partie intégrante de la stratégie d'une chaîne logistique durable. Selon le prix du carbone et les différentes stratégies de la chaîne logistique quant à ses émissions et au recyclage, ils imaginent différents scénarios et en tirent des conclusions. Pour une stratégie verte à long-terme, un contexte législatif stable est nécessaire et l'intégration des principes d'analyse du cycle de vie des produits permet de la maximiser.

Cette étude, à partir de différents paramètres (financiers, techniques et carbone), compare le coût d'investissements verts avec comme objectif la baisse des émissions avec le prix des crédits carbone.

Ces deux premiers articles, s'ils traitent des émissions d'équivalent $CO_2$, n'ont pas la même approche que nos travaux.

3. (Lee, 2011) étudie l'empreinte carbone d'une chaîne logistique dans l'industrie automobile. Par collecte de données et entretiens auprès des salariés de Hyundai Motor Company, il a réalisé des cartes d'émissions. Il a ainsi calculé les émissions d'équivalent $CO_2$ dues aux matières premières, à la production et à la distribution pour une chaîne simplifiée pour un exemple donné. L'auteur identifie trois limitations à ces recherches :
   - un exemple limite la généralisation,
   - son cas est très spécifique,
   - ses mesures reposent sur des auto-évaluations des gestionnaires de l'entreprise.

D'après lui, il serait donc intéressant de pouvoir généraliser ses recherches. Dans ce cas, les émissions dues aux matières premières et au mode de fabrication ne pourraient par contre pas être retenues.

Cet article se rapproche de nos hypothèses de travail mais reste très spécifique. Pour chaque nouveau cas, il faut recréer des cartes et recalculer les émissions.

D'autres articles correspondent à nos recherches mais ne se limitent pas aux émissions de carbone. Un article basé sur une analyse à classification hiérarchique (AHP) propose de faire évaluer la chaîne logistique d'un point de vue environnemental par un groupe Delphi d'experts environnementaux (Handfield et al., 2002). Cette méthode a été complétée en incluant un point de vue managérial (Lu et al., 2007b). Aucune de ces deux études n'est centrée sur les émissions d'équivalent $CO_2$. Elles évaluent la chaîne logistique de manière globale : utilisation des matériaux, consommation d'énergie, résidus solides, liquides et gazeux. De plus, l'AHP semble avoir quelques limites : il n'y a pas de hiérarchie simple pour la plupart des critères et le point de vue humain peut biaiser les résultats. Deux autres études portent sur le choix des fournisseurs. (Chan, 2003) et (Kannan et al., 2008) étudient différents indicateurs également. Pour l'analyse, ils utilisent un modèle appelé Modèle de Sélection Interactive qui automatise les étapes de l'implémentation de l'AHP. Mais toutes ces études reposent sur des analyses statistiques basées sur des données collectées. Ceci réduit les cas et requiert une grande qualité des données.

Ces limitations nous ont motivé à proposer une autre approche méthodologique.

## III. 5. **Conclusion**

(Harrel and Tumay, 1994) indique deux méthodes : une génératrice de solutions et une permettant l'évaluation de solutions. La première compte les optimisations linéaires, dynamiques, etc. Pour la deuxième, (Beamon, 1998) définit quatre modèles : déterministe (avec des modèles analytiques), stochastique (avec des modèles analytiques en contexte stochastique), économique (basé sur des théories économiques, la théorie des jeux, etc.). La portée de ces modèles mathématiques reste toutefois limitée. Pour être résolus dans un temps raisonnable, ils doivent être simplifiés. Or, une chaîne logistique est un ensemble complexe (Pirard et al., 2006).

Enfin, un autre outil est la simulation. Elle est caractérisée par trois adjectifs (Erard and Déguénon, 1996) : dynamique ou statique selon les modifications possibles dans le temps, déterministe (automatique) ou aléatoire, continu ou discret. (Ingalls, 1998) souligne que c'est l'outil indispensable pour un système complexe et dynamique. (Ingalls, 1998, Shannon, 1975) indique que la simulation permet non seulement d'évaluer mais également d'observer le comportement de la chaîne logistique. La méthode par simulation prend en effet de plus en plus de place autant en recherches qu'en industries. L'un des avantages de la simulation est de pouvoir tester des scénarii avant de les appliquer réellement (Banks J., 1998). (Kim et al., 2004) rajoute que le modèle configuré peut servir de prototype. Cette capacité à évaluer des scénarii « que se passe-t-il si ? » avec un grand panel d'entrées fait de la simulation un outil très utile pour l'analyse des chaînes logistiques ((Hellström J. and Johnsson M., 2002). Certains auteurs argumentent que l'actuelle popularité de la simulation est due à son excellente capacité à évaluer des systèmes variables et interdépendants (Wyland et al., 2000).

Cela permet aux preneurs de décisions de choisir entre différentes solutions en connaissant l'impact de leur choix sur tous les maillons de la chaîne logistique.

Il existe différents logiciels de simulation de chaîne logistique : ARENA, QNAP, Automod, Cadence, etc. (Tewoldeberhan et al., 2002) classe le logiciel ARENA au premier rang dans son classement de logiciels. Ce logiciel permet la modélisation, la simulation et l'animation de systèmes de production avec une approche objet[8]. Pour nos recherches, nous utilisons donc la simulation à événements discrets.

Une seule étude récente utilise la simulation pour créer une chaîne logistique verte (Hui K. et al., 2006). Elle concerne la distribution d'aluminium et compare la pollution due au transport avec différents autres paramètres. Elle est basée sur des conditions idéales et les auteurs soulignent qu'il serait intéressant de rendre le modèle plus réaliste. Nous allons donc analyser différents choix d'efficacités, de localisations et de produits en simulant un modèle de chaîne logistique prenant en compte les aléas (rebuts, retards, etc.). Ce modèle est configuré sous le logiciel ARENA.

[8] l'approche objet permet de privilégier à la fois les données et leurs traitements.

# Synthèse de la partie 1

Dans le premier chapitre, nous avons décrit et caractérisé les chaînes logistiques pour définir notre périmètre d'étude. Dans notre modèle, la chaîne logistique est donc composée d'un fournisseur de matières premières, de trois producteurs et d'un client final. Ses activités se limitent aux approvisionnements, transformations et distribution. Nos recherches répondront à plusieurs principes de la gestion de la chaîne logistique notamment dans le choix des fournisseurs, l'écoute de la demande finale, l'adoption d'une mesure de performance commune à l'ensemble de la chaîne, etc. Pour qualifier cette performance, nous utiliserons le taux de rendement synthétique. La revue de littérature de la gestion de la chaîne logistique nous a également montré que la prise en compte du contexte autour de cette chaîne logistique était importante. Or, le développement durable est un élément de ce contexte.

Dans le deuxième chapitre, nos recherches nous montrent que la prise de conscience de l'environnement par le grand public a été suivie par celle des états. Le développement durable a été défini avec ses trois paramètres : économique, écologique et social. L'un des piliers de cette prise de conscience est les gaz à effet de serre. Des mesures sont notamment prises : instauration de quotas carbone et d'un marché européen du carbone, taxe carbone en vigueur dans certains pays, l'obligation de Bilan Carbone® en France, l'étiquetage carbone, etc. Les clients, les actionnaires et les états poussent de plus en plus les entreprises à en tenir compte. Le développement durable doit donc être transposé à la chaîne logistique

Dans le chapitre trois, deux pôles du triptyque du développement durable sont notamment étudiés. Nous retenons des indicateurs financiers (stock, taux de service, nombre de kilomètres) et un indicateur environnemental (émissions d'équivalent $CO_2$). Ce dernier sera quantifié le long de la chaîne logistique pour les émissions liées aux stockage et transport. De plus, notre modèle de chaîne logistique prend en compte les aléas (rebuts, retards, etc.). Il analyse différents choix d'efficacités, de localisations et de produits. Ce modèle est configuré sous le logiciel ARENA.

# PARTIE 2 : MODELISATION D'UNE CHAINE LOGISTIQUE VERTE

# Chapitre I METHODOLOGIE DE RECHERCHE

I. 1. Introduction .....
I. 2. Démarche .....
I. 3. Modèle logistique .....
I.3.1 Chaîne logistique .....
I.3.2 Entreprise .....
I.3.3 Transport .....
I.3.4 Flux de produits .....
I. 4. Structure du modèle de simulation .....
I. 5. Règles de gestion .....
I.5.1 Règles d'approvisionnements et de livraison .....
I.5.2 Règles de gestion des stocks .....
I. 6. Paramètres .....
I.6.1 Paramètres des entreprises .....
I.6.2 Paramètres de transport .....
I.6.3 Paramètres des produits .....
I.6.4 Facteurs d'émissions d'équivalent de dioxyde de carbone .....

## I. 1. **Introduction**

L'état de l'art présenté dans la partie précédente nous permet de positionner nos travaux de recherche dans leur contexte. Ces derniers s'inscrivent dans la continuité des travaux d'(Essaïd M., 2008). Sa thèse portait sur la connectivité des flux logistiques. Nous élargissons son modèle à l'étude d'une chaîne logistique verte. De nombreuses études analysent la logistique inverse ou le design des produits. Mais peu s'intéressent aux émissions d'équivalent carbone de la chaîne logistique elle-même. Dans ce contexte, il nous semble intéressant d'explorer cette piste de recherche.

Deux approches de modélisation sont envisageables : générative et évaluative. La première a pour but une solution optimale. Ceci empêche donc toute généralisation et trouve ses limites face à la complexité des chaînes logistiques. La seconde compare différents scénarios grâce notamment à la simulation. Cette approche nous paraît plus adaptée à notre recherche.

Notre recherche a pour objectif de proposer un guide d'aide à la décision pour la configuration de chaîne logistique verte. Le modèle de chaîne logistique peut être instancié suivant un certain nombre de paramètres. Nous définissons ainsi différents profils de chaînes logistiques. Ils ont tous en commun un processus de fabrication et un mode de gestion. Mais ils ont trois facteurs de différentiation possibles : leur capabilité modélisée par le taux de rendement synthétique, le type de produits fabriqués et la localisation de chacun de leurs maillons. Ces différentes configurations sont ensuite simulées. Nous les analysons en termes de stocks, taux de remplissage des modes de transport, taux de service et émissions d'équivalent $CO_2$.

Notre travail tente de répondre à la question : comment assurer une bonne performance environnementale tout en gardant une bonne performance logistique, financière et un bon taux de service ?

## I. 2. **Démarche**

La chaîne logistique étudiée a plusieurs profils possibles. Toutes les chaînes simulées ont des caractéristiques communes : leur type de process et leur système de pilotage. par contre, chacune possède des facteurs de différenciation. Trois données techniques sont modifiables : la capabilité du process, la localisation et le type de produits. Chacune de ces données peut prendre quatre valeurs différentes.

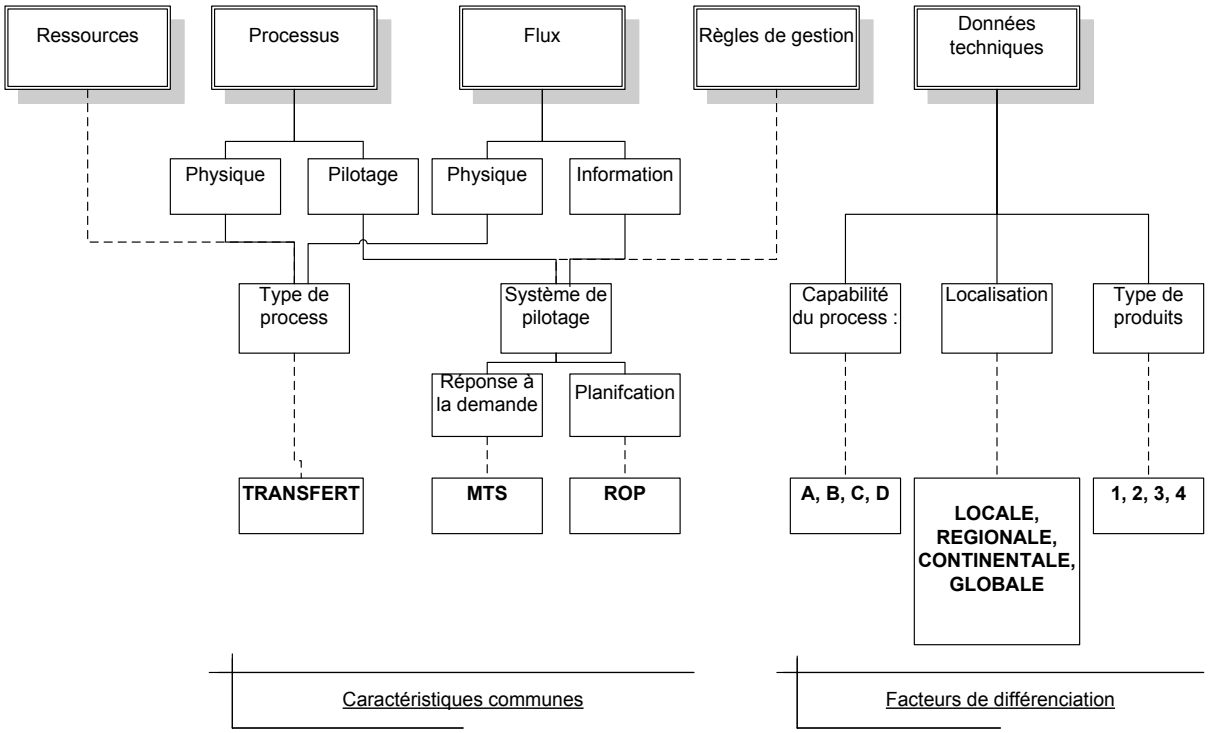



Figure 33 : Construction de profils d'entreprises

Les trois entreprises composant la chaîne logistique étudiée ont donc le même type de process (transfert), le même système de pilotage (réponse à la demande : MTS; planification : ROP). Par contre, les données techniques varient. Les entreprises ont des profils différents :

| | **Entreprise 1** | | | | **Entreprise 2** | | | | **Entreprise 3** | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Efficacité (A,B,C,D)** | A | B | C | D | A | B | C | D | A | B | C | D |
| **Localisation**<br>**- local=l**<br>**- régional=r**<br>**- continental=c**<br>**- global=g** | l | r | c | g | l | r | c | g | l | r | c | g |
| **Type de produits**<br>**- petit/léger : 1**<br>**- petit/lourd : 2**<br>**- grand/léger : 3**<br>**- grand/lourd : 4** | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 |

Le type de produits restent le même tout au long de la chaîne.

Tableau 9 : Profils d'entreprises

# I. 3. **Modèle logistique**

## I.3.1 Chaîne logistique

Le cadre de notre étude est la configuration d'une chaîne logistique verte à travers différents profils pour répondre à une demande de marché.

Le modèle proposé (figure 34) consiste en un fournisseur de matières premières, une chaîne logistique composée de trois entreprises et un client final. Le fournisseur de matière première est considéré à stock infini. Les commandes du client final suivent une demande externe stochastique. Cette demande concerne deux produits dont la fabrication et les livraisons sont indépendantes.

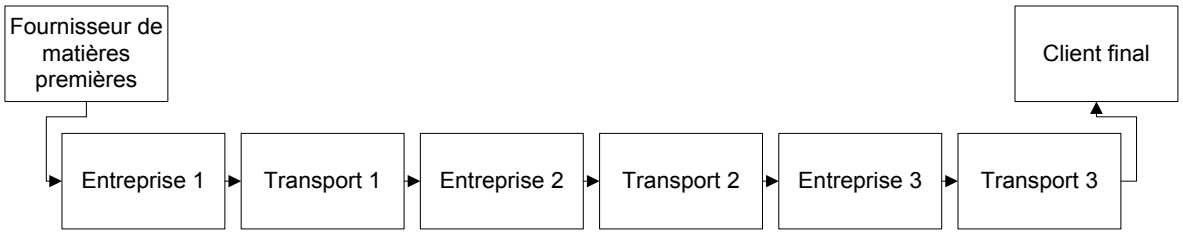



Figure 34 : Modèle de chaîne logistique

## I.3.2 Entreprise

Chaque entreprise comporte (figure 35) un module réception et deux processus en série, transformant les matières premières (MP) en produits semi-finis (PSF) et les PSF en produits finis (PF). Les processus de production sont des lignes de transfert sur lesquelles deux flux de produits sont traités simultanément.

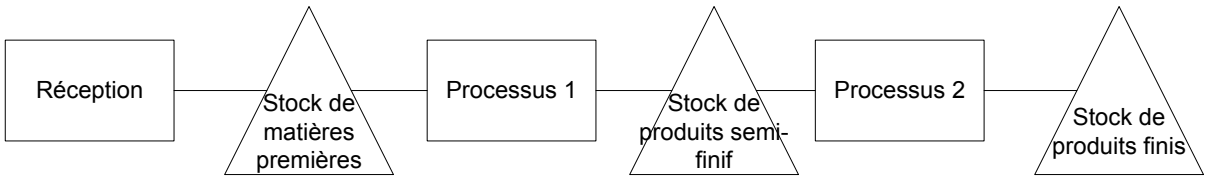



Figure 35 : Modèle d'entreprise

## I.3.3 Transport

Entre chaque entreprise, un module de transport permet de simuler différents types de transport par : air, eau, route voire rail (figure 36). De plus, deux types de stock tampon sont dimensionnés selon la fréquence et le délai de livraison.

Un collecteur de données $CO_2$ est relié aux trois modules de transport.

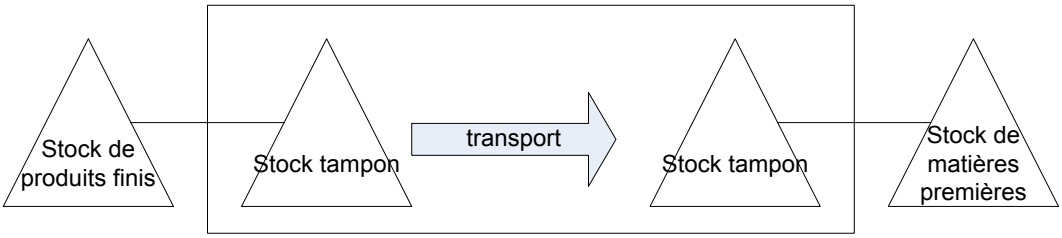



Figure 36 : Modèle de transport

### I.3.4 Flux de produits

Nous avons choisi un flux de deux produits par transfert (T) car nous n'étudions pas les émissions dues au mode de fabrication et afin de simplifier le modèle de simulation. La configuration du flux de deux produits permettra lors de futures recherches de simuler d'autres modes de fabrication : assemblage et différenciation.

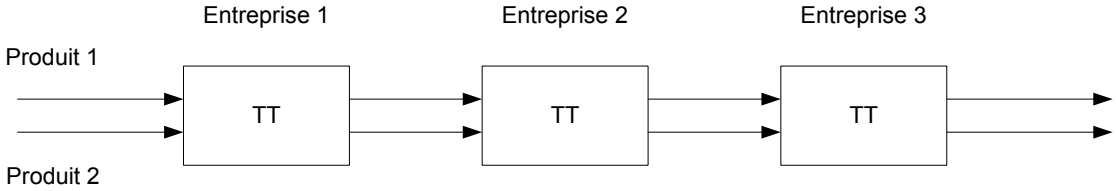



Figure 37 : Process de production

Cette chaîne logistique est modélisée sous ARENA. Nous allons donc étudier la structure du modèle sous ce logiciel.

## I. 4. **Structure du modèle de simulation**

La structure du modèle implanté sous ARENA est la suivante :

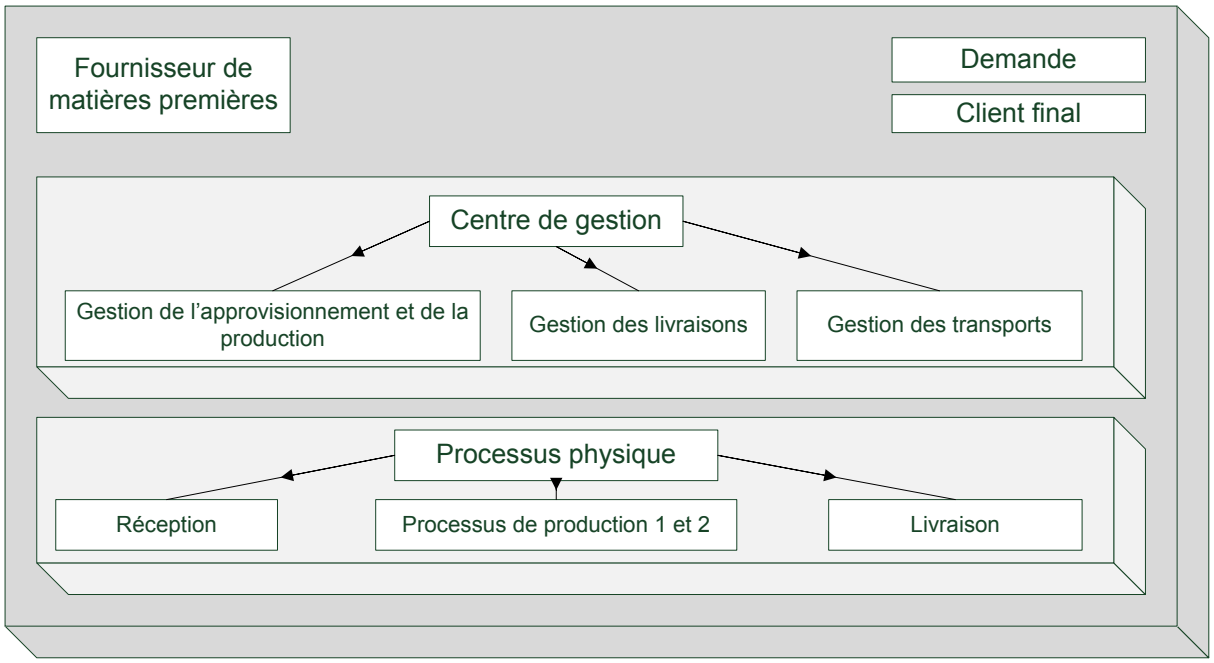



Figure 38 : Structure du modèle sous ARENA

La station fournisseur est activée dès que l'entreprise 1 passe une commande de matières premières.

La demande crée alternativement toutes les 24 heures deux commandes pour chacun des deux produits selon une loi normale N(50,5).

La station client final compte les commandes et les quantités livrées. Elle enregistre également les commandes à l'heure et en retard pour calculer le taux de service servant d'indicateur de performance.

Le centre de gestion gère le pilotage de la chaîne logistique et comporte trois stations.

La première concerne l'approvisionnement et la production (figure 39).

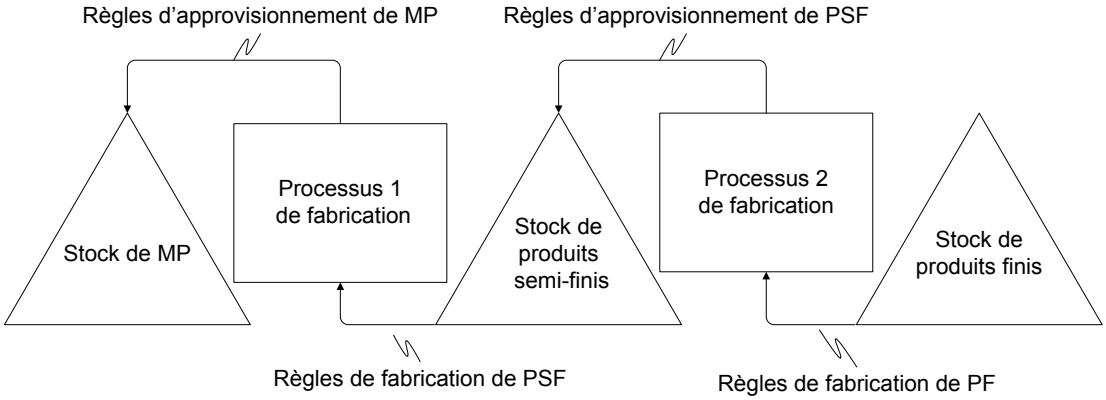



Figure 39 : Schéma des règles au sein de l'entreprise

Selon les numéros attribués à chaque maillon de la chaîne (figure 40), elle applique différentes règles de gestion (figure 41) que nous expliciterons au paragraphe 1.5.1.

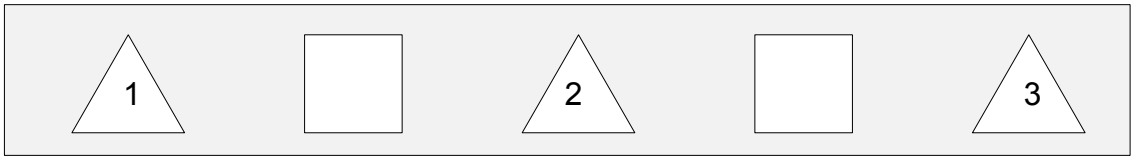



Figure 40 : Exemple de numérotation pour l'entreprise 1

La deuxième station ordonne les livraisons.

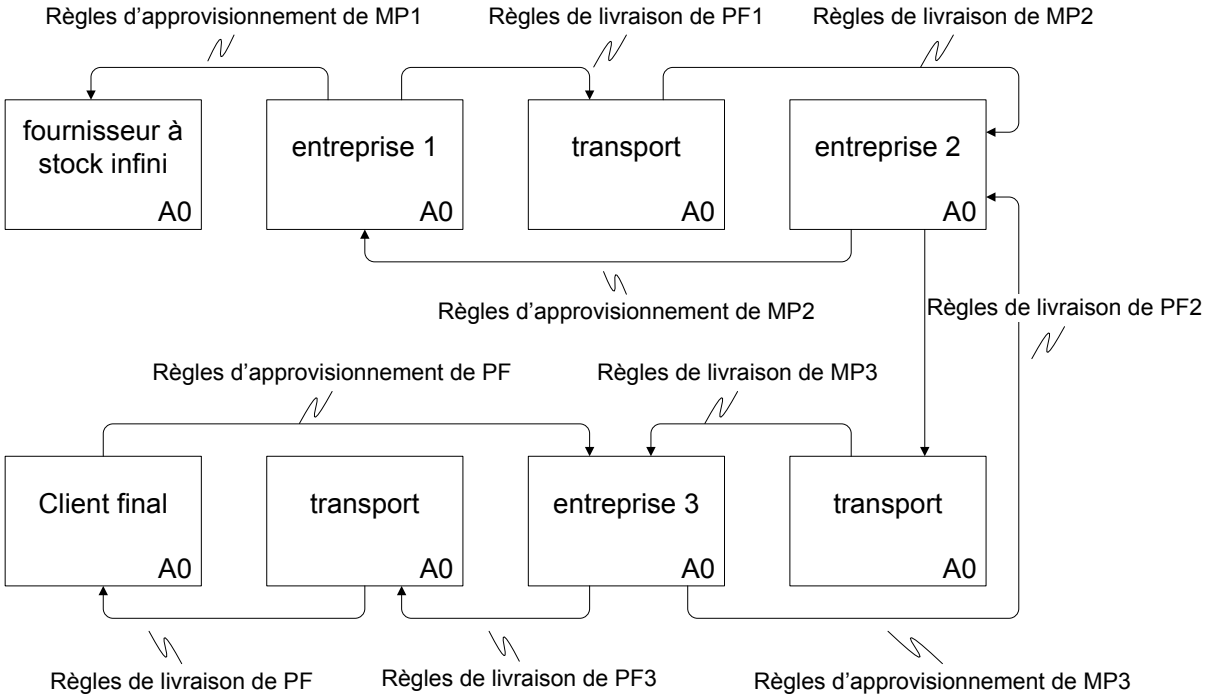



Figure 41 : Schéma des règles d'approvisionnement et de livraison pour la chaine logistique

La troisième gère les transports selon des règles expliqués au paragraphe 1.5.2. Elle comporte de plus un compteur d'émissions de $CO_2$ dues au transport.

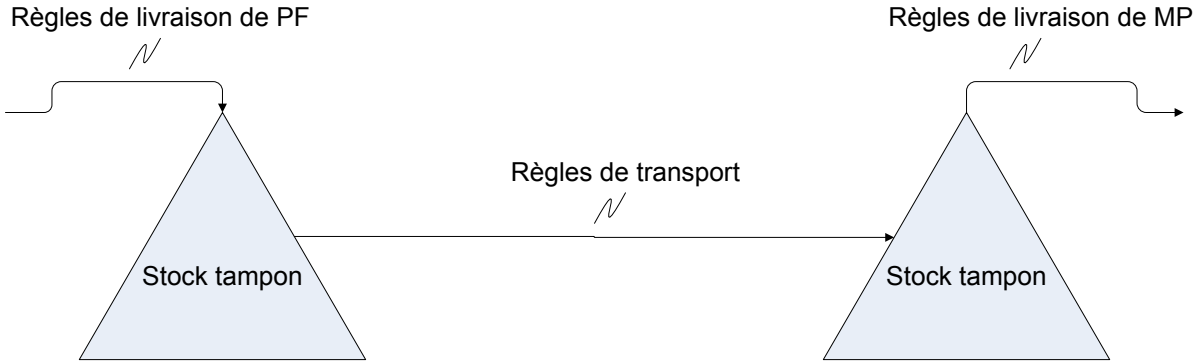



Figure 42 : Schéma des règles de transport

Le système physique est un ensemble de stations :

- Réception,
- Production,
- Livraison.

La réception enregistre les entrées de matériaux. La production est un enchaînement de deux process de fabrication séparés par un stock de produits semi-finis. Les paramètres des process dépendent de l'efficacité de l'entreprise. La livraison, selon des règles explicitées au paragraphe 1.5.1, permet l'expédition des produits finis à l'entreprise suivante.

## I. 5. **Règles de gestion**

### I.5.1 Règles d'approvisionnements et de livraison

Dans le centre de gestion, les règles d'approvisionnements sont les suivantes. A partir de la commande passée à l'entreprise 3 par le client final, l'entreprise 3 scrute son stock.

- Si le stock de produits finis est supérieur à la quantité commandée, le nombre de produits commandés part en livraison. Un signal indique au module de transport qu'une livraison est prête. Les transports sont périodiques. Pour des raisons de paramétrage de simulation, les commandes sont traitées dès leur arrivée dans le module de transport. Un temps d'attente est calculé selon leur date de réception et rajouté au temps de transport de chaque commande. Ce temps[9] est calculé ainsi :

$$temps\ d'attente = \left(E\left(\frac{date\ de\ réception}{fréquence\ des\ transports}\right)+1\right) \times fréquence\ de\ transport - date\ de\ réception$$

  Dans le cas de configurations continentale ou globale, si la date de commande est inférieure à la date de réception de la commande dans le module transport additionnée du temps d'attente et de la durée de transport, un transport en avion est paramétré. La livraison est réceptionnée chez le client final. Deux compteurs (commandes en retard ou à l'heure) permettent le calcul du taux de service.

- Si le stock de produits finis est égal ou supérieur à 75% de la commande, la quantité en stock part en livraison. Un ordre de fabrication de produits finis est lancé pour le reliquat. La quantité commandée correspond à la taille de lot. Le stock est scruté toutes les heures et le reliquat sera livré dès que le niveau de stock le permettra. Il n'y a pas de reliquat de reliquat.
- Si le stock est inférieur à 75% de la commande, la livraison attend et une commande de produits finis est passée. Puis, le stock est scruté toutes les heures pour vérifier son

[9] Exemple : pour un temps de réception de la commande à la 25ème heure et une fréquence de transport de 4h. Le temps d'attente sera de

$$\left(E\left(\frac{25}{4}\right)+1\right) \times 4 - 25 = 7 \times 4 - 25 = 3\ heures$$

niveau. Dès qu'un niveau de stock suffisant est atteint, la commande est livrée par le module transport avec les mêmes règles que celles décrites précédemment.

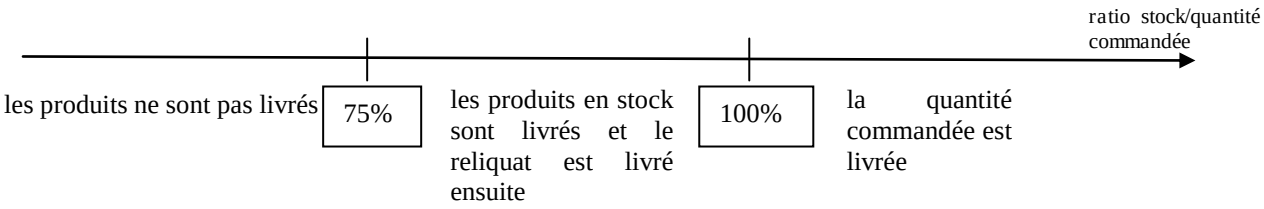



Figure 43 : Règles de livraison

Si une commande de produits finis est passée, le stock de produits semi-finis est scruté :

- Si son stock est supérieur à la quantité commandée, la fabrication de produits finis est lancée.
- Si son stock est inférieur à la quantité commandée, une commande de matières premières est passée.

Le stock de matières premières est alors scruté :

- Si ce stock est supérieur à la quantité commandée, la fabrication de produits semi-finis est lancée.
- Si le stock est inférieur à la quantité commandée, une commande de produits finis est passée à l'entreprise 2.

Les règles sont identiques pour l'entreprise 2 une fois que l'entreprise 3 lui passe une commande ; de même pour l'entreprise 1 une fois que l'entreprise 2 lui passe une commande.

### I.5.2 Règles de gestion des stocks

Indépendamment des commandes, les différents stocks sont scrutés toutes les heures :

- Pour les entreprises 2 et 3 :
  - Un seuil de sécurité est défini :

$$stock\ de\ sécurité = demande\ moyenne \times \left(\frac{1}{taux\ de\ performance \times taux\ de\ disponibilité} - 1\right)$$

Si les stocks de produits finis et semi-finis sont inférieurs au seuil de sécurité mis en place pour palier les aléas, rebuts, etc. , des ordres de fabrication sont lancés.

  - Un deuxième stock de sécurité pour les matières premières est défini en tenant compte du transport des pièces :

$$stock\ de\ sécurité\ de\ MP = stock\ de\ sécurité + consommation\ moyenne\ par\ heure \times (fréquence\ de\ transport + durée\ de\ transport\ en\ heures)$$

Si le stock de matières premières est inférieur au seuil de sécurité additionné au stock tampon dus à la fréquence et à la durée des transports, une commande de matières premières est passée.

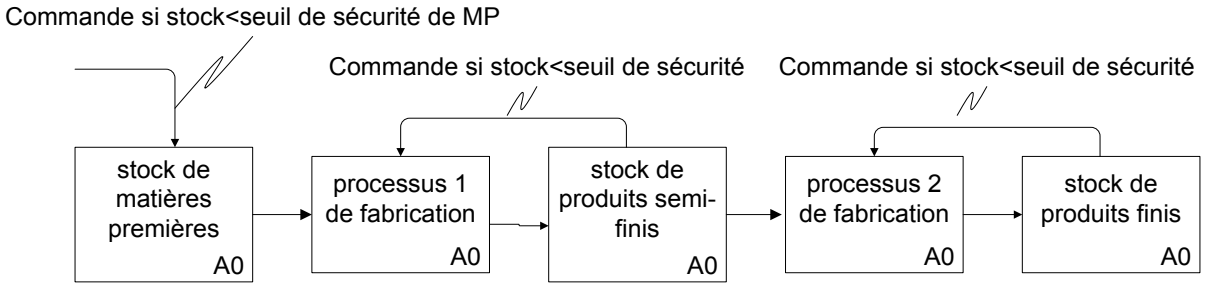



Figure 44 : Schéma des règles pour les entreprises 2 et 3

- Pour l'entreprise 1, si les trois stocks sont inférieurs au seuil de sécurité, des ordres de fabrication ou commande de matières premières sont lancés. En effet, le fournisseur de matières premières initial est à stock infini et à durée de transport nulle.

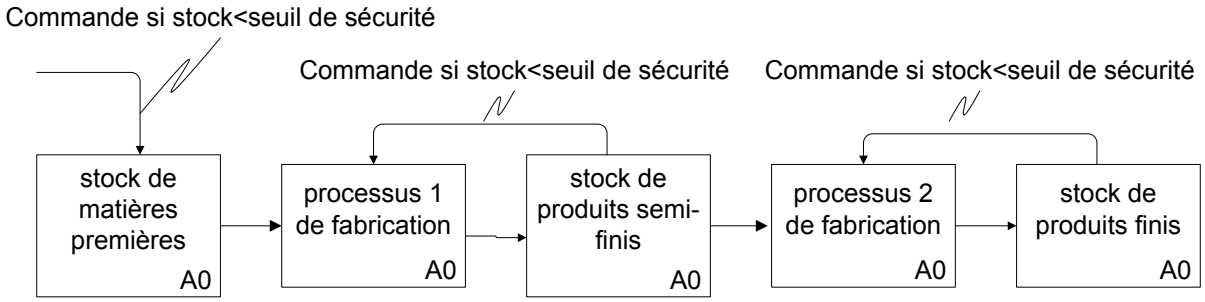



Figure 45 : Schéma des règles pour l'entreprise 1

Afin d'instancier le modèle, plusieurs paramètres sont nécessaires :

- paramètres des entreprises,

- paramètres de transport.

# I. 6. **Paramètres**

## I.6.1 Paramètres des entreprises

Nous avons défini quatre classes d'efficacité en reprenant les travaux d'(Essaïd M., 2008). Chacune est définie par un intervalle de taux de rendement synthétique :

- classe A : 80%<TRS<97%,
- classe B : 65%<TRS<79%,
- classe C : 50%<TRS<64%,
- classe D : 38%<TRS<49%.

Les entreprises de classe A sont les plus performantes, les entreprises de classes B,C et D correspondent à une dégradation des différents indicateurs de performance de respectivement 5%, 10% et 20 %. Le taux de rendement synthétique est calculé de la manière suivante :

$$disponibilité \times performance \times qualité$$

Pour chaque classe, ces trois critères sont fixés. A partir du TRS, nous obtenons les paramètres nécessaires pour caractériser les entreprises. Considérons les différents temps ci-dessous :

<table>
<tr><td colspan="3">Temps de Production Planifié (TPP)</td></tr>
<tr><td colspan="2">Temps Opérationnel (TO)</td><td>Pertes de disponibilité</td></tr>
<tr><td>Temps Opérationnel Net (TON)</td><td>Pertes de performance</td><td></td></tr>
<tr><td>Temps Productif (TP)</td><td>Pertes de qualité</td><td></td></tr>
</table>

Tableau 10 : Définition des différents temps

A partir du TRS et du TPP, nous obtenons le TO :

$$temps\ opérationnel = TPP \times pourcentage\ de\ disponibilité$$

Nous fixons le TPP à 10 heures par jour. Les temps dépendront de la capabilité de l'entreprise.

D'après le tableau, le TON est calculé à partir du TO :

$$temps\ opérationnel\ net = TP \times pourcentage\ de\ performance$$

Puis le TP est calculé à partir du TON :

$$temps\ productif\ =\ TON \times pourcentage\ de\ qualité$$

Afin de paramétrer le modèle, nous avons besoin des temps d'indisponibilités. Le temps d'indisponibilité total est :

$$temps\ d'indisponibilité = TPP - TO$$

Ce temps est réparti selon le temps d'indisponibilité dû aux pannes, aux set-up et autres causes d'inactivités. Nous fixons à 10% les pourcentages des deux premières indisponibilités pour une classe A puis respectivement 20%, 30%, 40% pour les classes B, C et D.

$$temps\ de\ panne = temps\ de\ set\ up = pourcentage * temps\ d'indisponibilité$$

$$temps\ d'indisponibilités\ autres = (1 - 2 \times pourcentage) * temps\ d'indisponibilité$$

Le tableau ci-dessous récapitule les données chiffrées nécessaires à ces calculs :

| classe | A | B | C | D |
|---|---|---|---|---|
| **% pertes** | | 5% | 10% | 20% |
| **TRS** | 85% | 73% | 62% | 44% |
| **disponibilité** | 90% | 86% | 81% | 72% |
| **% pannes** | 10% | 20% | 30% | 40% |
| **% set-up** | 10% | 20% | 30% | 40% |
| **% autres** | 80% | 60% | 40% | 20% |
| **performance** | 95% | 90% | 86% | 76% |
| **qualité** | 99% | 95% | 90% | 80% |

Tableau 11 : Exemples de TRS et de ses paramètres

A partir de ces données, nous obtenons les paramètres de simulation suivants :

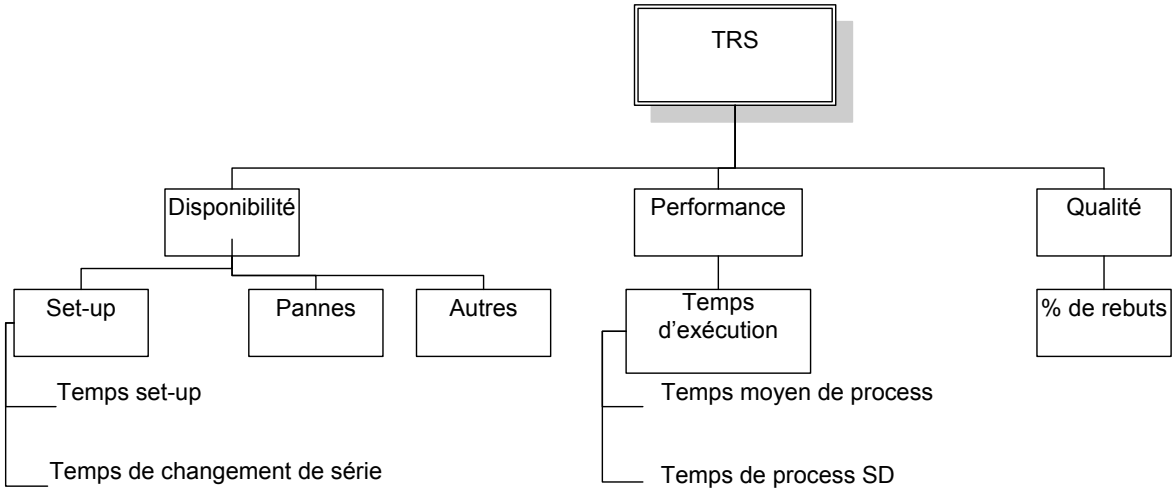



Figure 46 : Composantes du TRS

A partir temps total de pannes et de set-up explicités ci-avant, le nombre de lancements d'OF par jour et la fréquence de pannes, nous déduisons :

- Le Mean Time Between Failure (MTBF),
- Le Mean Time To Repair (MTTR),
- Le temps de set-up unitaire.

En majorant le temps de set-up, nous établissons le temps de changement de série qui est appliqué dans les cas où deux OF consécutifs concernent deux produits différents.

Pour les temps de process, nous avons besoin des cadences. Nous fixons la cadence.

$$cadence = nombre\ d'unités\ produites\ par\ minute = 0{,}1\text{ppm}$$

Puis, nous la corrigeons selon l'efficacité de l'entreprise. Pour les entreprises de type B, C et D, la cadence corrigée tient compte d'heures supplémentaires nécessaires.

$$cadence\ corrigée\ (A) = cadence \times TRS$$

$$cadence\ corrigée\ (k) = cadence \times TRS \times \frac{temps\ productif\ (A)}{temps\ productif\ (k)}\ avec\ k = B, C, D$$

Nous pouvons alors calculer les temps moyens suivants :

$$temps\ de\ process\ moyen\ goulot = \frac{1}{cadence \times 60}$$

$$\text{temps de process moyen non goulot} = (1 - 20\%) \times \text{temps de process moyen goulot}$$

$$temps\ de\ set\ up\ unitaire = \frac{temps\ set\ up}{nombre\ de\ lancement}$$

$$temps\ de\ changement\ de\ série = (1 + 10\%) \times temps\ de\ set\ up$$

$$temps\ de\ manutention = 10\% \times temps\ de\ process\ moyen\ goulot$$

Tous les pourcentages utilisés dans ces calculs sont fixés et identiques selon les classes. Les valeurs numériques sont synthétisées dans le tableau ci-dessous.

| ***Classe d'entreprise ==>*** | **A** | **B** | **C** | **D** |
|---|---|---|---|---|
| **TRS** | 85% | 74% | 63% | 44% |
| **Disponibilité** | 90% | 86% | 81% | 72% |
| **Allure** | 95% | 90% | 86% | 76% |
| **Qualité** | 99% | 95% | 90% | 80% |
| **% Indispo pannes** | 10% | 20% | 30% | 40% |
| **% Indispo set up** | 10% | 20% | 30% | 40% |
| **% Indispo autre** | 80% | 60% | 40% | 20% |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Cadence [ppm]** | **0.100** | **0.100** | **0.100** | **0.100** |
| **Temps d'ouverture [h]** | **10** | | | |

| | **A** | **B** | **C** | **D** |
|---|---|---|---|---|
| temps productif | 8.46 | 7.35 | 6.27 | 4.38 |
| temps opérationnel net | 8.55 | 7.74 | 6.97 | 5.47 |
| temps opérationnel | 9.00 | 8.60 | 8.10 | 7.20 |
| **temps d'indisponibilité** | **1.00** | **1.40** | **1.90** | **2.80** |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Temps de pannes** | **0.100** | **0.280** | **0.570** | **1.120** |
| **Temps set up** | **0.100** | **0.280** | **0.570** | **1.120** |
| **Temps indispo autre** | **0.800** | **0.840** | **0.760** | **0.560** |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **MTBF** | **200.00** | **100.00** | **80.00** | **60.00** |
| **MTTR** | **2.00** | **2.80** | **4.56** | **6.72** |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Cadence corrigée [ppm]** | **0.10** | **0.10** | **0.12** | **0.15** |
| **Temps process moyen goulot [h]** | **0.175** | **0.161** | **0.144** | **0.113** |
| **Excédent relatif non-goulot** | 20% | 20% | 20% | 20% |
| **Temps process moyen non- goulot** | **0.140** | **0.129** | **0.115** | **0.091** |
| **Nombre de lancement par jour (min)** | 4 | 4 | 4 | 2 |
| **Temps set up unitaire** | **0.029** | **0.070** | **0.143** | **0.560** |
| **Excédent relatif de temps de changement de produit** | 10% | 10% | 10% | 10% |
| **Temps de changement de produit** | **0.031** | **0.077** | **0.157** | **0.616** |
| **Rapport du temps de manutention sur le temps de process** | 10% | 10% | 10% | 10% |
| **Temps de manutention (reception, livraison)** | **0.018** | **0.016** | **0.014** | **0.011** |

Tableau 12 : Feuille de calcul des temps de process (Essaïd M., 2008)

### I.6.2 Paramètres de transport

De même que les modules d'entreprise, les modules de transport nécessitent des paramètres.

Nous avons donc défini quatre localisations : locale, régionale, continentale et globale. Les données nécessaires à leur configuration sont synthétisées ci-dessous :

| **numéro de la configuration** | **localisation** | **mode de transport** | **nombre de km** | **temps de transport en heures** | **fréquence en heures** |
|---|---|---|---|---|---|
| **1** | TEMOIN | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **2** | LOCALE | CAMION | 50 | 4 | 4 |
| **3** | REGIONALE | CAMION | 500 | 8 | 8 |
| **4** | CONTINENTALE | CAMION | 1500 | 40 | 20 |
| **5** | CONTINENTALE | AVION | 1500 | 8 | 8 |
| **6** | GLOBALE | BATEAU | 8000 | 240 | 40 |
| **7** | GLOBALE | AVION | 8000 | 8 | 8 |

Pour assurer notre choix du taux de service de 100%, nous avons configuré des transports express pour les configurations continentale et globale. Si la livraison normale doit arriver en retard par le moyen de transport habituel, la cargaison prendra l'avion.

Tableau 13 : Données de transport

### I.6.3 Paramètres des produits

Nous avons ordonné les produits en quatre classes selon les attributs suivants : lourd/léger, encombrant/non encombrant (figure 47) car les émissions de dioxyde de carbone dépendent du poids transporté et de l'encombrement de stockage. Le produit léger non encombrant est représenté par un thermostat, le lourd non encombrant par un compresseur, le léger

encombrant par un SPA et le lourd encombrant par un chiller[10]. Ce choix est défini pour l'ensemble de la chaîne logistique :

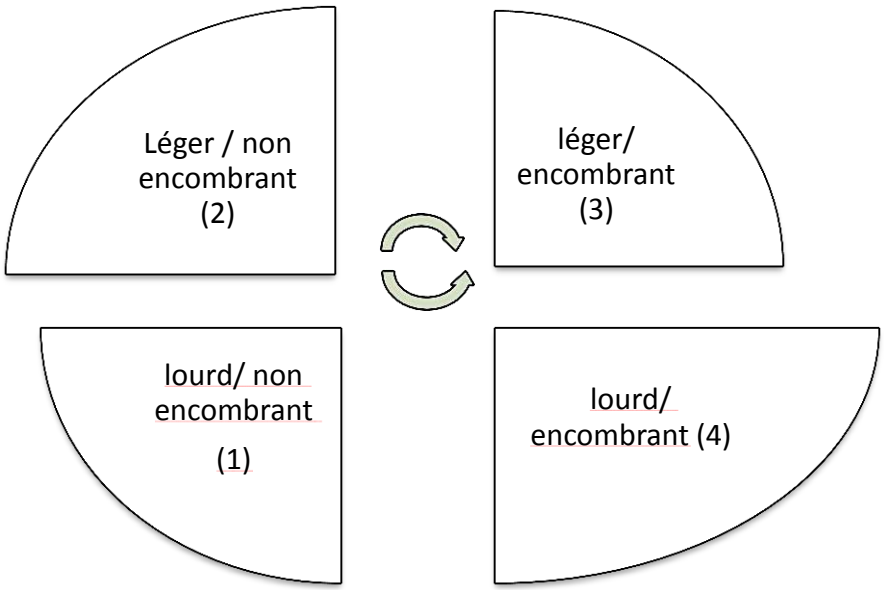



Figure 47 : Type de produits

Les données des produits 1, 2 et 4 proviennent de l'entreprise Carrier. Depuis 1993, Carrier (groupe UTC), un fabricant de climatiseurs, s'est employé à réduire son empreinte écologique. En 2003, l'Agence Américaine pour la Protection de l'Environnement l'a reconnu comme leader dans la protection environnementale. Il fabrique des produits innovants en travaillant sur la diminution de consommation d'eau et d'énergie. Il tente à présent pour comprendre la complexité des liens entre les indicateurs industriels (principalement stocks et délais) et l'impact environnemental d'une gestion quotidienne. Les données du produit 3 sont issues de l'industrie plasturgique.

Les hypothèses suivantes ont été retenues pour calculer l'encombrement au sol des produits. Il n'est pas possible d'empiler des produits de type 3 et 4 donc leur dimension en m² correspondent à leur encombrement au sol. Pour les autres produits, des racks de cinq mètres de hauteur sont utilisés. Le nombre de produits stockables sur une telle hauteur est estimé et nous déterminons ainsi la surface au sol nécessaire pour un produit (figure 48).

[10] chiller : groupe d'eau glacée ou refroidisseur de liquide

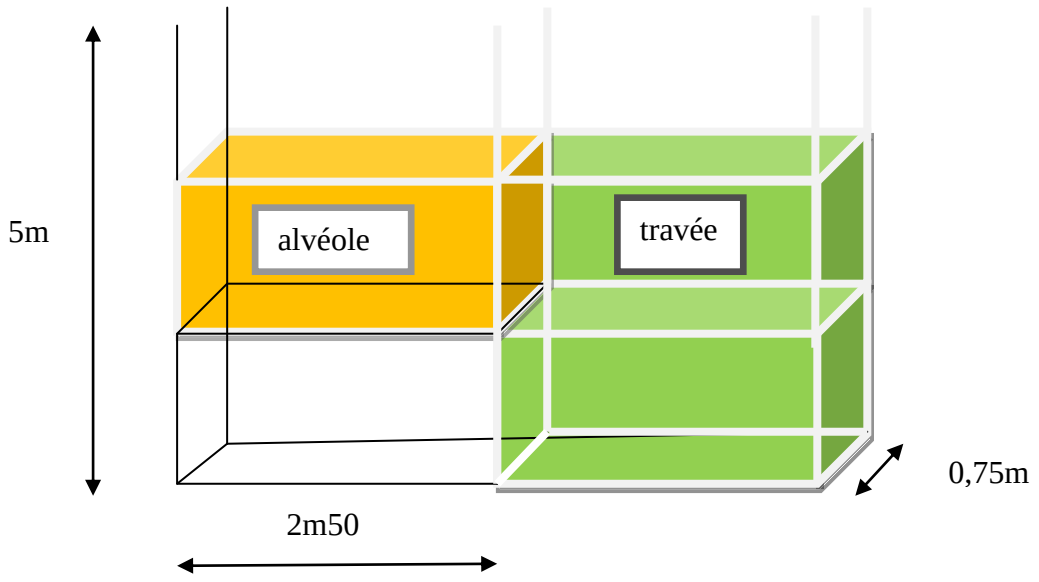



Figure 48 : descriptif d'un rack

Dans le hangar de stockage, les allées et passages représentent 60% de la surface de stockage afin de laisser circuler les engins de manutention.

Les paramètres qui caractérisent ces produits dans le cadre de la simulation sont synthétisés dans les tableaux 14 à 17.

| **secteur** | **mécanique** |
|---|---|
| **référence** | Compresseur |
| **Numéro du produit** | 1 |
| **Poids en tonnes** | 0.288 |
| **Longueur en m** | 0.84 |
| **Largeur en m** | 0.64 |
| **Encombrement en m²** | 0.54 |
| **Hauteur en m** | 0.64 |
| **Nombre moyen de produits en hauteur** | 8 |
| **Encombrement moyen au sol pour un produit en m² (40% de l'aire totale)** | 0.0688 |
| **Aire des allées en m² (60% de l'aire totale)** | 0.1032 |
| **Aire totale en m² pour un produit** | 0.1720 |
| **densité (tonne/m$^3$)** | 0.84 |

Tableau 14 : Paramètres du produit 1

| **secteur** | **électronique** |
|---|---|
| **référence** | Thermostat |
| **Numéro du produit** | 2 |
| **Poids en tonnes** | 0.0000055 |

| | |
|---|---|
| **Longueur en m** | 0.1524 |
| **Largeur en m** | 0.1016 |
| **Encombrement en m²** | 0.0155 |
| **Hauteur en m** | 0.0051 |
| **Nombre moyen de produits en hauteur** | 980 |
| **Encombrement moyen au sol pour un produit en m² (40% de l'aire totale)** | 0.000016 |
| **Aire des allées en m² (60% de l'aire totale)** | 0.000024 |
| **Aire totale en m² pour un produit** | 0.000039 |
| **densité (tonne/m$^3$)** | 0.07 |

Tableau 15 : Paramètres du produit 2

| **secteur** | **plastique** |
|---|---|
| **référence** | SPA |
| **Numéro du produit** | 3 |
| **Poids en tonnes** | 0.45 |
| **Longueur en m** | 2.2 |
| **Largeur en m** | 2.3 |
| **Encombrement en m²** | 5.0600 |
| **Hauteur en m** | 0.95 |
| **Nombre moyen de produits en hauteur** | 1 |
| **Encombrement moyen au sol pour un produit en m² (40% de l'aire totale)** | 5.0600 |
| **Aire des allées en m² (60% de l'aire totale)** | 7.5900 |
| **Aire totale en m² pour un produit** | 12.650000 |
| **densité (tonne/m$^3$)** | 0.09 |

Tableau 16: Paramètres du produit 3

| **Secteur** | **mécanique** |
|---|---|
| **Référence** | Chiller |
| **Numéro du produit** | 4 |
| **Poids en tonnes** | 8.44 |
| **Longueur en m** | 9.57 |
| **Largeur en m** | 2.25 |
| **Encombrement en m²** | 21.5325 |
| **Hauteur en m** | 2 |
| **Nombre moyen de produits en hauteur** | 1 |
| **Encombrement moyen au sol pour un produit en m² (40% de l'aire totale)** | 21.5325 |
| **Aire des allées en m² (60% de l'aire totale)** | 32.2988 |
| **Aire totale en m² pour un produit** | 53.831250 |
| **densité (tonne/m$^3$)** | 0.20 |

Tableau 17 : Paramètres du produit 4

Pour implémenter le modèle, nous avons également besoin des taux d'émissions de dioxyde carbone du stockage et du transport pour les quatre types de produits.

### I.6.4 Facteurs d'émissions d'équivalent de dioxyde de carbone

Afin de calculer les émissions de carbone de la chaîne logistique, nous utilisons des facteurs d'émissions d'équivalent de dioxyde de carbone. Toutes les données de ce paragraphe proviennent de l'ADEME.

Pour le tableau 18, on notera que les camions utilisés pour les destinations locales sont plus petits que pour les destinations régionales ou continentales. Par conséquent les émissions par tonne.km d'équivalent CO2 sont plus importantes dans le premier cas. Pour les transports par avion, le décollage et l'atterrissage sont plus émetteurs d'équivalent CO2 d'où les émissions par km plus élevées pour les moyens que pour les longs courriers. Pour les transports en bateau, le facteur d'émissions dépend de la densité du produit et est différent selon les quatre types de produits choisis. Le facteur d'émissions du stockage représente l'empreinte carbone en $kgCO_2$ par m² de la construction d'un hangar de stockage.

| **Transport/ stockage** | **$gCO_2$ équivalent par tonne.km ou par m² (incertitude)** |
|---|---|
| **Local (l)** | 145,10 (10%) |
| **Regional (r) ou Continental (c)** | 74,90 (10%) |
| **Global (g)** | |
| **Produit 1** | 3,57(10%) |
| **Produit 2** | 42,86(10%) |
| **Produit 3** | 33,33(10%) |
| **Produit 4** | 13,64(10%) |
| | |
| **Express continental** | 570 (20%) |
| **Express global** | 320 (20%) |
| **Hangar industriel** | 75 000 (50%) |

Tableau 18 : Facteurs d'émissions en gCO2 équivalent

Un compteur de kilomètres par mode de transport et un compteur de poids de produits transportés permet de connaître le nombre total de kilomètres de la chaîne logistique et ainsi de connaître les émissions dues au transport :

$$\text{émissions dues au transport en } gCO_2 \text{ équivalent} = \text{nombre de kilomètres} \times \text{poids de produits transportés} \times \text{facteur d'émissions}$$

Chaque stock maximal de produits de chaque entreprise permet de calculer les émissions dues au stockage :

$$\text{émissions dues au stockage en } gCO_2 \text{ équivalent} = m^2 \text{ de stockage} \times \text{facteur d''émissions}$$

Une fois, le modèle implémenté, il doit être calibré.

# Chapitre IICALIBRAGE DU MODELE

II. 1. Calibrage de l'efficacité des entreprises .....
II. 2. Calibrage des durées de transport .....
II. 3. Nombre et temps des réplications .....

Avant de réaliser une campagne de simulation, le comportement du modèle doit être testé. Le modèle est calibré selon chaque efficacité, localisation et produits possibles.

Ce calibrage permet de fixer et de valider les différents paramètres de gestion : seuil, stock, TAOF. L'hypothèse prise, le modèle doit répondre à une demande du marché qui suit une loi normale N(50,5) et assurer un taux de service de 100% pour le client final. D'autres choix auraient été possibles et feront l'objet d'un développement dans les perspectives de recherches au chapitre.

## II. 1. **Calibrage de l'efficacité des entreprises**

Nous avons choisi quatre efficacités possibles pour les entreprises au chapitre I. Chaque classe d'entreprise (A, B, C, D) est définie par un ensemble de valeurs. Ces valeurs sont reprises dans le tableau 19 :

| **classe A** | **réception** | **fabrication 1** | **fabrication 2** | **livraison** |
|---|---|---|---|---|
| **temps** | TRIA(0.01,0.02,0.03) | TRIA(0.15,0.17,0.19) | TRIA(0.13,0.16,0.18) | TRIA(0.01,0.02,0.03) |
| **temps setup** | | TRIA(0.08,0.1,0.3) | TRIA(0.08,0.1,0.3) | |
| **temps exdie** | | TRIA(0.1,0.2,0.4) | TRIA(0.1,0.2,0.4) | |
| **stock initial** | 300 | 114 | 114 | |
| **taille de lot** | TRIA(45,50,55) | TRIA(45,50,55) | TRIA(45,50,55) | |
| **seuil** | TRIA(65,70,75) | TRIA(65,70,75) | TRIA(65,70,75) | |
| **TQL** | 0.99 | 0.99 | 0.99 | |
| **MTBF** | | EXP(200) | EXP(200) | |
| **MTTR** | | EXP(1.5) | EXP(1.5) | |
| **TAOF** | | 0.75 | 0.75 | 0.75 |
| | | | | |
| **classe B** | réception | fabrication 1 | fabrication 2 | livraison |
| **temps** | TRIA(0.01,0.02,0.03) | TRIA(0.11,0.14,0.16) | TRIA(0.10,0.12,0.14) | TRIA(0.01,0.02,0.03) |
| **temps setup** | | TRIA(0.15,0.2,0.4) | TRIA(0.15,0.2,0.4) | |
| **temps exdie** | | TRIA(0.17,0.19,0.2) | TRIA(0.17,0.19,0.2) | |
| **stock initial** | 300 | 114 | 114 | |
| **taille de lot** | TRIA(55,60,65) | TRIA(55,60,65) | TRIA(55,60,65) | |
| **Seuil** | TRIA(75,80,85) | TRIA(75,80,85) | TRIA(75,80,85) | |
| **TQL** | 0.96 | 0.96 | 0.96 | |
| **MTBF** | | EXP(150) | EXP(150) | |
| **MTTR** | | EXP(3) | EXP(3) | |
| **TAOF** | | 0.75 | 0.75 | 0.75 |
| | | | | |
| **classe C** | réception | fabrication 1 | fabrication 2 | livraison |
| **temps** | TRIA(0.01,0.02,0.03) | TRIA(0.10,0.11,0.12) | TRIA(0.09,0.10,0.11) | TRIA(0.01,0.02,0.03) |
| **temps setup** | | TRIA(0.3,0.4,0.6) | TRIA(0.3,0.4,0.6) | |
| **temps exdie** | | TRIA(0.4,0.5,0.8) | TRIA(0.4,0.5,0.8) | |
| **stock initial** | 300 | 114 | 114 | |
| **taille de lot** | TRIA(65,70,75) | TRIA(65,70,75) | TRIA(65,70,75) | |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Seuil** | TRIA(95,100,105) | TRIA(95,100,105) | TRIA(95,100,105) | |
| **TQL** | 0.93 | 0.93 | 0.93 | |
| **MTBF** | | EXP(100) | EXP(100) | |
| **MTTR** | | EXP(4) | EXP(4) | |
| **TAOF** | | 0.75 | 0.75 | 0.75 |
| | | | | |
| **classe D** | réception | fabrication 1 | fabrication 2 | livraison |
| **Temps** | TRIA(0.01,0.02,0.03) | TRIA(0.08,0.09,0.1) | TRIA(0.07,0.08,0.09) | TRIA(0.01,0.02,0.03) |
| **temps setup** | | TRIA(0.5,0.7,1) | TRIA(0.5,0.7,1) | |
| **temps exdie** | | TRIA(0.7,1,1.4) | TRIA(0.7,1,1.4) | |
| **stock initial** | 300 | 114 | 114 | |
| **taille de lot** | TRIA(75,80,85) | TRIA(75,80,85) | TRIA(75,80,85) | |
| **seuil** | TRIA(115,120,125) | TRIA(115,120,125) | TRIA(115,120,125) | |
| **TQL** | 0.91 | 0.91 | 0.91 | |
| **MTBF** | | EXP(80) | EXP(80) | |
| **MTTR** | | EXP(5) | EXP(5) | |
| **TAOF** | | 0.75 | 0.75 | 0.75 |

Tableau 19 : Paramètres de simulation des entreprises adaptes d'(Essaid, 2008)

légende :

- temps : temps de process
- temps setup : temps de lancement d'ordre de fabrication
- temps exdie : temps de changement de série - stock initial
- taille de lot : taille de lot de process
- seuil : seuil de commande
- TQL : taux de qualité
- MTBF : Mean Time Between Failure
- MTTR : Mean Time To Repair
- TAOF : Taux d'Acceptation de lancement d'un Ordre de Fabrication

Enfin, nous devons étudier les temps de transport des marchandises.

## II. 2. **Calibrage des durées de transport**

Après étude des différents moyens de transport, nous avons estimé que les temps de transport (express, standard) moyens étaient les suivants en heures (tableau 20) sachant que :

- en local, régional et continental, le moyen de transport est le camion,
- en global, le moyen de transport est le bateau.

Pour chaque mode de transport, il existe un temps d'attente qui correspond à la fréquence de départ de chaque transport.

| Configuration | Locale | Régionale | Continentale | Globale |
|---|---|---|---|---|
| **Nom** | Standard | Standard | Standard | standard |
| **Temps de transport** | 4 | 8 | 40 | 240 |
| **Temps d'attente** | 4 | 8 | 20 | 40 |
| **Pour une distance en km de** | 50 | 500 | 1500 | 8000 |

Tableau 20 : Durée des transports en heures

Ces temps en heures sont calculés à partir d'une semaine de 40h. La production est considérée en flux continu.
En cas de retard pour les configurations continentale et globale, un mode de transport express en avion est modélisé. Celui-ci est automatiquement choisi si la date de livraison (incluant le transport) n'est pas réalisable. Les caractéristiques de ces transports sont indiquées ci-dessous dans le tableau 21 :

| Configuration | Continentale | Globale |
|---|---|---|
| **Temps de transport express** | 8 | 8 |
| **Temps d'attente** | 8 | 8 |

Tableau 21 : Durée des transports et des attentes express en heures

Pour valider la stabilité du modèle, nous avons envisagé les scénarii suivants en heures (tableau 22) pour des configurations homogènes :

| Configuration | Locale | | Régionale | | Continentale | | Globale | | Express |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Nom** | lll court | lll long | rrr court | rrr long | ccc court | ccc long | ggg court | ggg long | |
| **Temps de transport** | -1 | +1 | -4 | +4 | -8 | +8 | -40 | +40 | ±4 |
| **Temps d'attente** | -1 | +1 | -4 | +4 | -4 | +4 | -8 | +8 | ±4 |

Tableau 22 : Scenarii des temps de transport en heures

Nous estimons que :
- les transports locaux sont sujets à une variabilité d'une heure par rapport aux quatre heures totales,
- les régionaux ainsi que les transports express d'une demi-journée par rapport à une journée,
- les continentaux d'une journée par rapport à une semaine et les globaux d'une semaine par rapport à six semaines.

De même, les départs peuvent être décalés
- en local, d'une heure pour un départ toutes les quatre heures
- en régional, continental et express d'une demi-journée pour un départ tous les jours et tous les deux jours et demi,
- en global d'une journée pour un départ toutes les semaines.

Les résultats des différents scenarii sont présentés dans les figures 49 à 51.

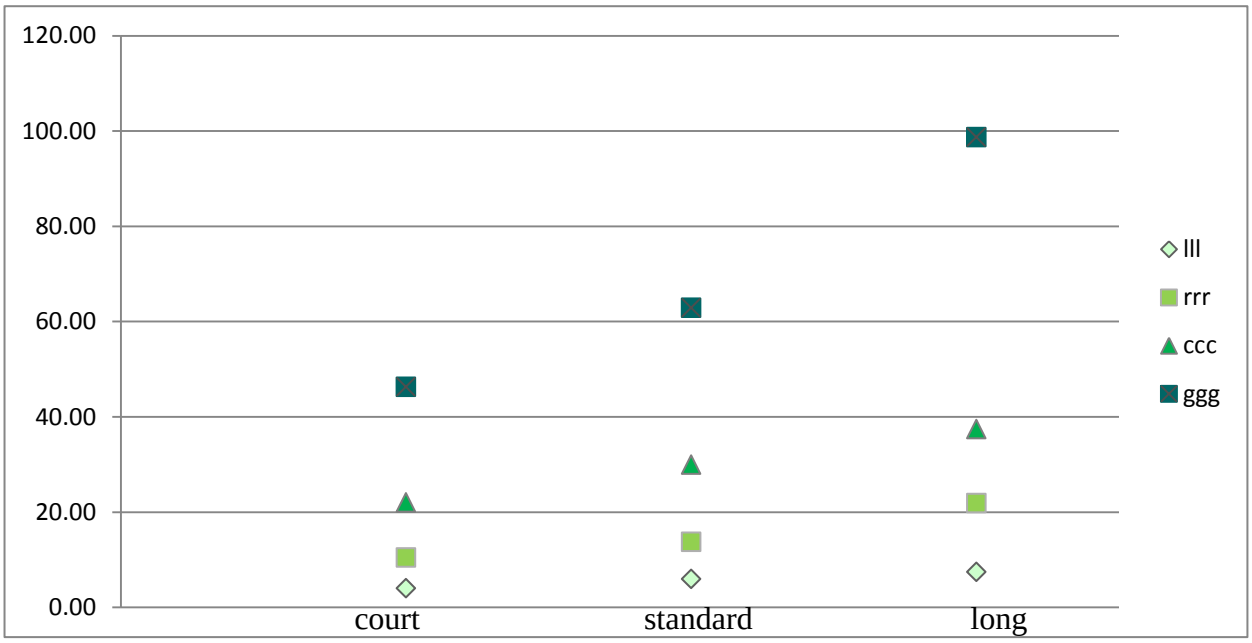



Figure 49 : Calibrage des temps d'attente en heures

En figure 49, les temps d'attente restent cohérents entre la donnée d'entrée et la donnée de sortie pour les configurations lll et ccc. La donnée d'entrée est le temps d'attente indiqué par les tableaux 20 à 22. La donnée de sortie correspond au temps total d'attente tout au long de la chaîne logistique. Il n'y a pas de discontinuité d'attente : aucune donnée d'entrée n'entraîne une donnée de sortie excessive. Pour un temps d'attente entré de cinq heures pour chaque transport soit quinze heures au maximum pour les trois entreprises, le temps d'attente de sortie est environ de sept heures. Si nous obtenions un chiffre supérieur, nous en conclurions que la production des produits serait décalée par rapport aux temps d'attente (figure 50). En effet, si les produits sont prêts à l'expédition avant le départ des transports, le temps d'attente est acceptable. Si, les produits sont, au contraire, prêts juste après le départ du transport, les temps d'attente sont à leur maximum. C'est alors inacceptable car irréaliste.

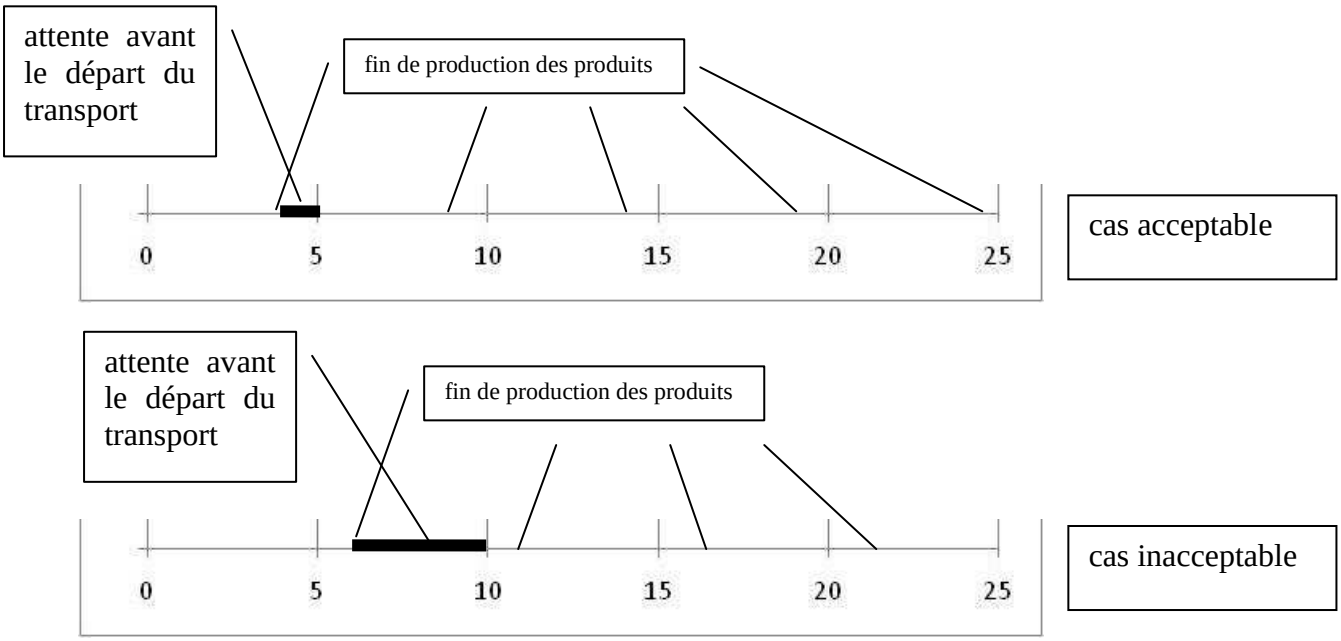



Figure 50 : Représentation des départs de transport toutes les cinq heures

Pour les configurations rrr et ggg, le modèle atteint ses limites puisque les variations maximales sont respectivement de 7 heures et 36 heures contre des données d'entrée de 3 heures et 24 heures. Par contre, les variations minimales sont acceptables. Nous avons par conséquent réalisé une autre simulation avec une variation de 0.5 heures pour la configuration régionale et de 4 heures pour la configuration globale (figure 51).

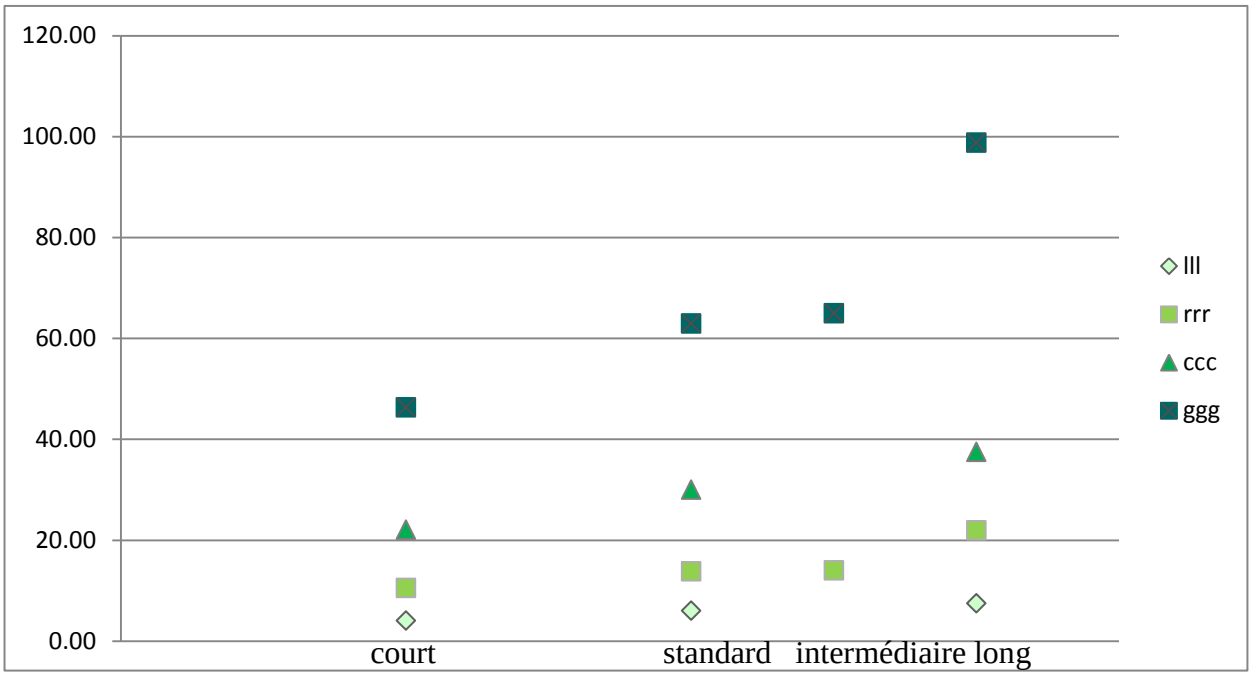



Figure 51: Calibrage des temps d'attente en heures

D'après la figure 51, nous pouvons considérer nos choix de temps d'attente pour les configurations régionales et globales comme stables car cette nouvelle simulation donne des résultats non divergents.

Nous suivons le même raisonnement pour les temps de transport. Ces derniers sont linéaires.

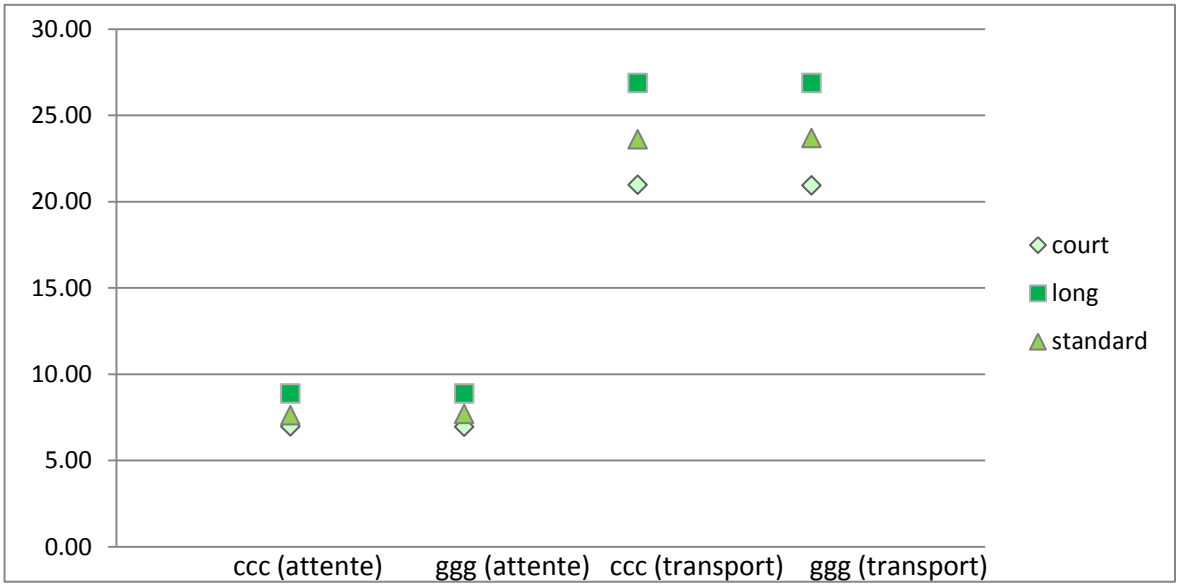



Figure 52 : Calibrage des temps d'attente et de transport express en heures

Les résultats donnés par la figure 52 sont cohérents avec ceux de la figure 51. En observant le temps le plus favorable et celui le moins favorable soit la longueur du segment représenté, nous en concluons que les transports express subissent des variations de l'ordre de 2 à 5% selon les entreprises pour la configuration ccc et de l'ordre de 5 à 7% pour la configuration ggg.

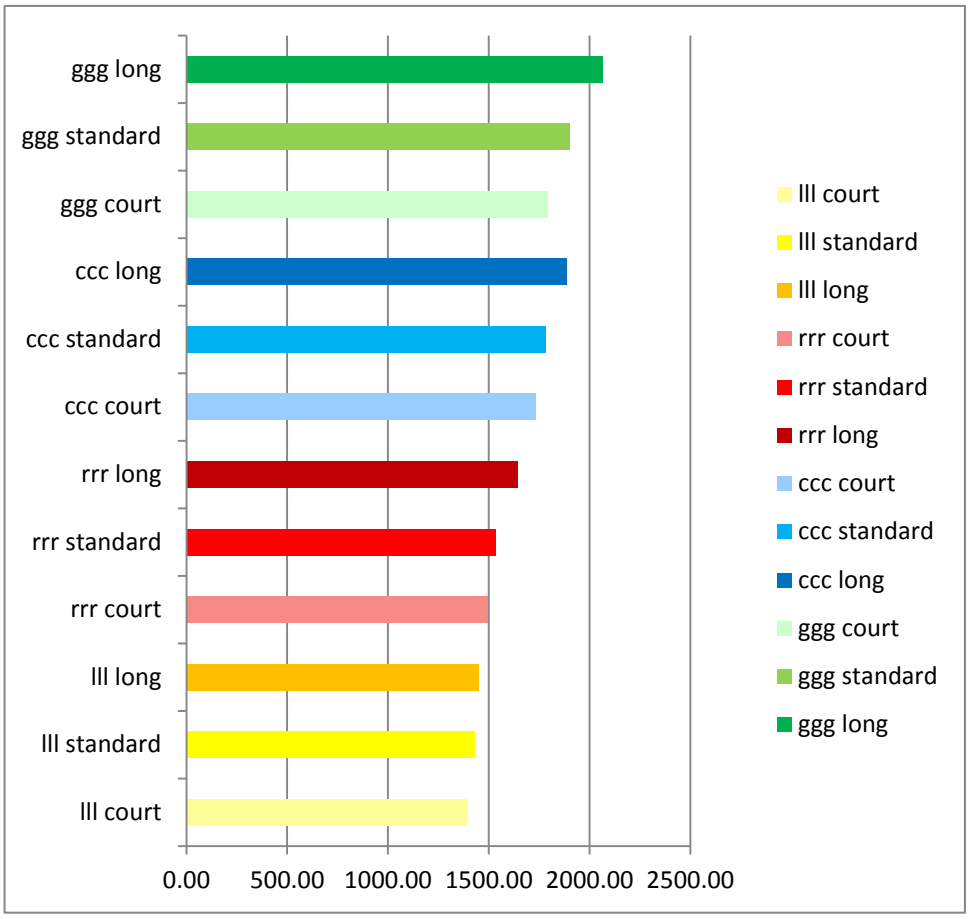



Figure 53 : Résultats des stocks totaux

Les stocks sont directement impactés par les changements de temps dus aux différents scenarii puisque les seuils de passage de commande et les stocks de sécurité sont dimensionnés selon les temps d'attente et de transport pour répondre au critère du taux de service de 100%. A la figure 53, les stocks varient de 4% entre la configuration la plus favorable et la moins favorable pour la configuration locale et de 9% pour la configuration régionale. Pour les configurations continentale et globale, les stocks fluctuent d'environ 9% et 13% entre la configuration la plus favorable et la moins favorable.

Les variations sont donc très inférieures aux changements de temps des différents scénarii qui sont de l'ordre de 20%. Nous pouvons donc estimer que le modèle est robuste pour nos données d'entrée.

Choisissons à présent le nombre et le temps des réplications.

## II. 3. **Nombre et temps des réplications**

Nous avons choisi 5 réplications de 40 000 heures soit vingt ans de fonctionnement de la chaîne logistique. Ce choix a été guidé par le fait que moins de cinq réplications était un chiffre trop faible pour effectuer des moyennes mais qu'un chiffre plus élevé n'apportait aucune précision supplémentaire (voir tableau 23). Les résultats sur des configurations homogènes sont réunis dans le tableau 24 :

| **Configuration** | **Locale** | **Régionale** | **Continentale** | **Globale** |
|---|---|---|---|---|
| **Nombre de commandes à l'heure** | | | | |
| Moyenne | 3332 | 3332 | 3332 | 3332 |
| Ecart-type | 0 | 1 | 0 | 0 |
| Variation en % | 0 | 0,03 | 0 | 0 |
| **Nombre de kilomètres** | | | | |
| Moyenne | 565 370 | 5 689 400 | 18 393 280 | 49 796 800 |
| Ecart-type | 5547 | 17 316 | 31155 | 256 358 |
| Variation en % | 1 | 0,1 | 0,5 | 0,5 |
| **Nombre de produits stockés** | | | | |
| Moyenne | 1433 | 1537 | 1786 | 1905 |
| Ecart-type | 2 | 15 | 21 | 45 |
| Variation en % | 0,15 | 1 | 1,2 | 2,3 |

Tableau 23 : Résultats de 5 réplications de 40 000 heures

| **Configuration** | **Locale** | **Régionale** | **Continentale** | **Globale** |
|---|---|---|---|---|
| **Nombre de commandes à l'heure** | | | | |
| Moyenne | 3332 | 3332 | 3332 | 3332 |
| Ecart-type | 0 | 0 | 1 | 0 |
| Variation en % | 0 | 0 | 0,03 | 0 |
| **Nombre de kilomètres** | | | | |
| Moyenne | 565 345 | 5 680 850 | 10 440 320 | 49 748 800 |
| Ecart-type | 4 683 | 38 039 | 66 356 | 420 238 |
| Variation en % | 0,8 | 0,7 | 0,6 | 0,8 |
| **Nombre de produits stockés** | | | | |
| Moyenne | 1436 | 1532 | 1800 | 1885 |
| Ecart-type | 4 | 17 | 32 | 51 |
| Variation en % | 0,3 | 1,1 | 1,8 | 2,7 |

Tableau 24 : Résultats des 10 réplications de 40 000 heures

D'après le tableau 23, les variations sont très faibles : nous considérons donc les réplications assez nombreuses et leur durée assez longue pour dépasser la phase transitoire du système et amortir les phénomènes aléatoires. Le tableau 24 montre que dix réplications n'apportent pas de variations plus faibles que cinq au tableau 23.

Pour chacune des configurations décrites dans le plan de simulation, nous effectuerons 5 répliques de 40 000 heures chacune.

# Synthèse

Le modèle de simulation proposé consiste en un fournisseur de matière première, une chaîne logistique composée de trois entreprises et d'un client final. Le fournisseur de matière première est considéré comme un stock infini. Les commandes du client final suivent une loi normale N(50,5). Chaque entreprise comporte:

- un système de planification et de contrôle qui gère les achats par la stratégie de réponse à la demande et coordonne les flux selon une stratégie Make To Stock (MTS). La demande finale est directement transformée en ordre de livraison de produits finis.
- un système physique composé de :
  - un module réception,
  - deux processus en série, transformant les matières premières (MP) en produits semi-finis (PSF) et les PSF en produits finis (PF). Les processus de production sont des lignes de transfert sur lesquelles deux flux de produits sont traités simultanément.

Enfin, entre chaque entreprise, un module livraison permet de simuler le transport et les stocks tampons inhérents aux délais de livraison. Ce module est composé de :

- une ressource transport qui peut être un camion, un bateau ou un avion, selon la distance entre deux entreprises. Si les produits finis sont en stock, ils sont automatiquement livrés. Sinon, si la date de livraison n'est pas réalisable, une livraison express est ordonnée pour les destinations continentales et globales
- des stocks tampons amont et aval qui sont dimensionnés selon la fréquence et le délai de livraison.

Un collecteur de données $CO_2$ est relié aux trois modules livraison. Le poids des produits et le nombre de kilomètres parcourus entre deux entreprises permettent de calculer les émissions de $CO_2$ dues au fret. L'Agence De l'Environnement Et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) détermine des émissions moyennes par tonne.km à partir d'émissions par véhicule.km et d'une estimation de poids transportés par véhicule. Les émissions dues au stockage représentent l'empreinte carbone en $kgCO_2$ par m² de la construction d'un hangar de stockage. Toutes ces données proviennent de l'ADEME.

Une bibliothèque de données a été créée pour construire les trois maillons de la chaîne. Des paramètres réels de fabrication sont utilisés pour construire cette bibliothèque de manière réaliste. Les données proviennent de l'entreprise Carrier et du secteur plasturgique. Plus généralement, les entreprises ont été classées selon trois attributs : taux de rendement synthétique (TRS), localisation et type de produit fabriqué :

- Le modèle utilise un indicateur de TRS pour classer les systèmes industriels selon leur niveau d'efficience. Il est défini comme suit : TRS = Disponibilité × Performance × Qualité. La Disponibilité est mesurée en temps d'arrêt de production. La Performance est évaluée à partir des pertes de productivité. Enfin, la Qualité est définie en pourcentage de rebuts. Le TRS est un indicateur généralisé, facile à calculer pour les entreprises et offre une évaluation globale du processus de production. De plus, le TRS peut être implémenté facilement comme paramètre de simulation (cadences, pannes, taux de rebuts, temps de réglage). Le TRS varie aléatoirement selon les

instances de simulations mais est compris entre 90% et 99% pour une A, 80% et 89% pour une B, 70% et 79% pour une C et entre 60% et 69% pour une D.

- Les produits sont envoyés d'une entreprise à l'autre par bateau, par camion ou par combinaison de ces trois modes de transport. Pour les destinations locale, régionale ou continentale, le mode de transport est le camion ; pour la destination globale le bateau. L'avion sera employé pour les transports continentaux ou globaux express. Pour calculer les émissions de $CO_2$, nous devons modéliser la distance entre deux compagnies et estimer le poids et l'encombrement des produits. Les émissions dépendent du poids transporté, du mode de transport utilisé, de la distance parcourue et de l'encombrement de stockage. En effet, l'unité des émissions de $CO_2$ est g ou kg par m² ou tonne.km. D'abord, la distance entre deux maillons de la chaîne logistique est définie selon quatre possibilités : locale, régionale, continentale ou globale. Dans le module livraison, en cas de retard, un mode de transport express en avion est modélisé. Celui-ci est automatiquement choisi si la date de livraison (incluant le transport) n'est pas réalisable.
- Nous avons ordonné les produits en quatre classes selon les attributs suivants : lourd/léger, encombrant/non encombrant. Les produits seront illustrés par les données de Carrier pour trois d'entre-deux. Le produit encombrant mais léger sera instancié par des données du secteur de la plasturgie.

Avant de commencer la simulation, la chaîne logistique doit être configurée. Ajouter un type d'entreprise revient à choisir dans la bibliothèque : une localisation (l, r, c ou g), un type de produit (1, 2, 3, 4) et une efficience (A, B, C, D). Par conséquent, les trois maillons ont des profils différents. Une fois les informations extraites de la bibliothèque, le modèle est automatiquement formé. Le logiciel de simulation ARENA est utilisé.

Les processus de production, de réglage, de changement d'outillage suivent une loi triangulaire. La disponibilité est ajustée via les pannes qui sont modélisées par une fonction exponentielle. Cette dernière représente les temps moyens entre les pannes, les réparations et les réglages. La performance est réglée selon les cadences des machines. Tous ces paramètres sont fixés pour atteindre le taux d'efficience requis pour le cas étudié. Après avoir rentré ces variables dans le profil de l'entreprise, les variables de commande comme le point de pénétration de la commande et la taille de lots sont calibrées. Dans notre approche, les stocks sont calibrés pour un taux de service de 100% et des transports express sont modélisés en dernier recours.

Cinq simulations de 40 000 heures chacune sont effectuées pour chaque configuration. Les campagnes de simulations sont donc suffisamment nombreuses et longues pour dépasser la phase transitoire du système et se prémunir de phénomènes aberrants.

# PARTIE 3 : RESULTATS ET ANALYSE DES RESULTATS

# Chapitre I PLAN DE SIMULATION

I. 1. Nombre de simulations .....
I. 2. Plan de simulation.....
I.2.1 Présentation des 2560 simulations .....
I.2.2 Plan d'expériences .....

## I. 1. **Nombre de simulations**

Pour élaborer le plan de simulation, nous agissons sur trois données d'entrée : la localisation, l'efficacité et le type de produits. La combinaison de quatre localisations (l, r, c, g), quatre efficacités (A, B, C, D) dans une chaîne logistique de trois acteurs donnent un total de 4096 simulations par quatre types de produits soit 16 384 au total. Nous choisissons de garder les quatre produits[11] et les 64 combinaisons des quatre localisations[12] (figure 54).

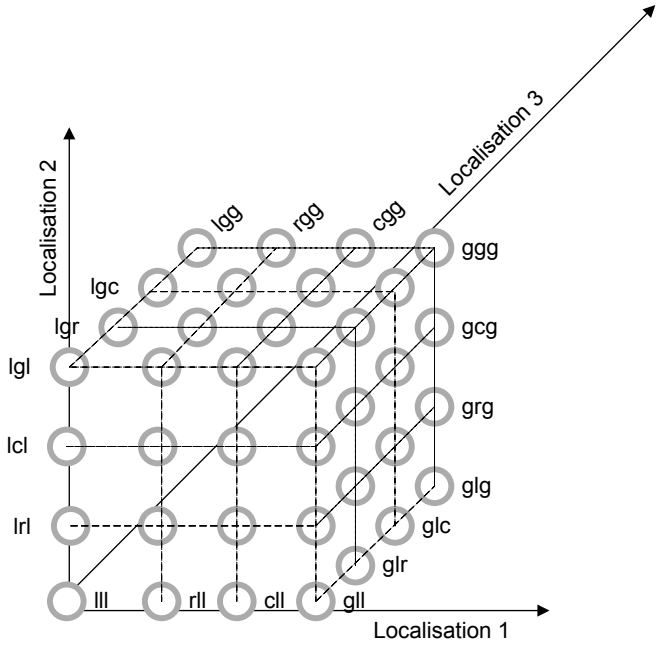



Figure 54 : 64 configurations de localisation

Mais, nous limitons les possibilités concernant les efficacités. Après essais, il nous est apparu, comme nous le verrons dans la partie ci-après, que les classes A et B se comportaient de manière presque similaire ainsi que les classes C et D. Ainsi, nous gardons les combinaisons ayant les caractéristiques suivantes :

- homogénéité : AAA, BBB, CCC, DDD,
- dégradation de l'efficacité : AAD, ADA, DAA, DDA, DAD, ADD

Soit 10 combinaisons possibles.

Nous simulons donc l'ensemble des 640 simulations correspondantes pour chacun des quatre produits soit 2560 simulations.

[11] rappel : produit 1: léger/non encombrant, produit 2 : lourd/non encombrant, produit 3 : léger/encombrant, produit 4 : lourd/encombrant

[12] rappel : local=l, régional=r, continental=c, global=g

# I. 2. **Plan de simulation**

## I.2.1 Présentation des 2560 simulations

Nous traitons ces 2560 simulations par une analyse en composantes multiples sur quatre critères : deux financiers et deux environnementaux. Les deux critères financiers sont le nombre de produits stockés et le nombre de kilomètres parcourus. Les deux critères environnementaux sont les émissions dues au transport et au stockage. L'analyse en composantes principales a pour objectif de décrire l'ensemble des données par de nouvelles variables en nombre réduit. Ces nouvelles variables sont des combinaisons linéaires des variables originales, et portent le nom de Composantes Principales (CP). Nous projetons ces données sur des plans factoriels, chaque plan étant défini par une paire de Composantes Principales prise parmi les premières CP. Nous traiterons les simulations avec les logiciels Sphinx et Xlstat.

Les deux axes sont définis comme suit :

| | Axe 1 (+40.82%) | | Axe 2 (+34.18%) | |
|---|---|---|---|---|
| CONTRIBUTIONS POSITIVES | émission dues au stockage | +49.0% | nombre de km | +47.0% |
| | émissions dues au transport | +44.0% | nombre de produits stockés | +45.0% |
| | | | | |
| CONTRIBUTIONS NEGATIVES | nombre de km | -2.0% | | |
| | nombre de produits stockés | -2.0% | | |
| | | | | |

Tableau 25 : Contributions aux axes

Ainsi, l'axe 1 représente les critères environnementaux et l'axe 2 les critères financiers. Les 2560 configurations sont réparties de la manière suivante :

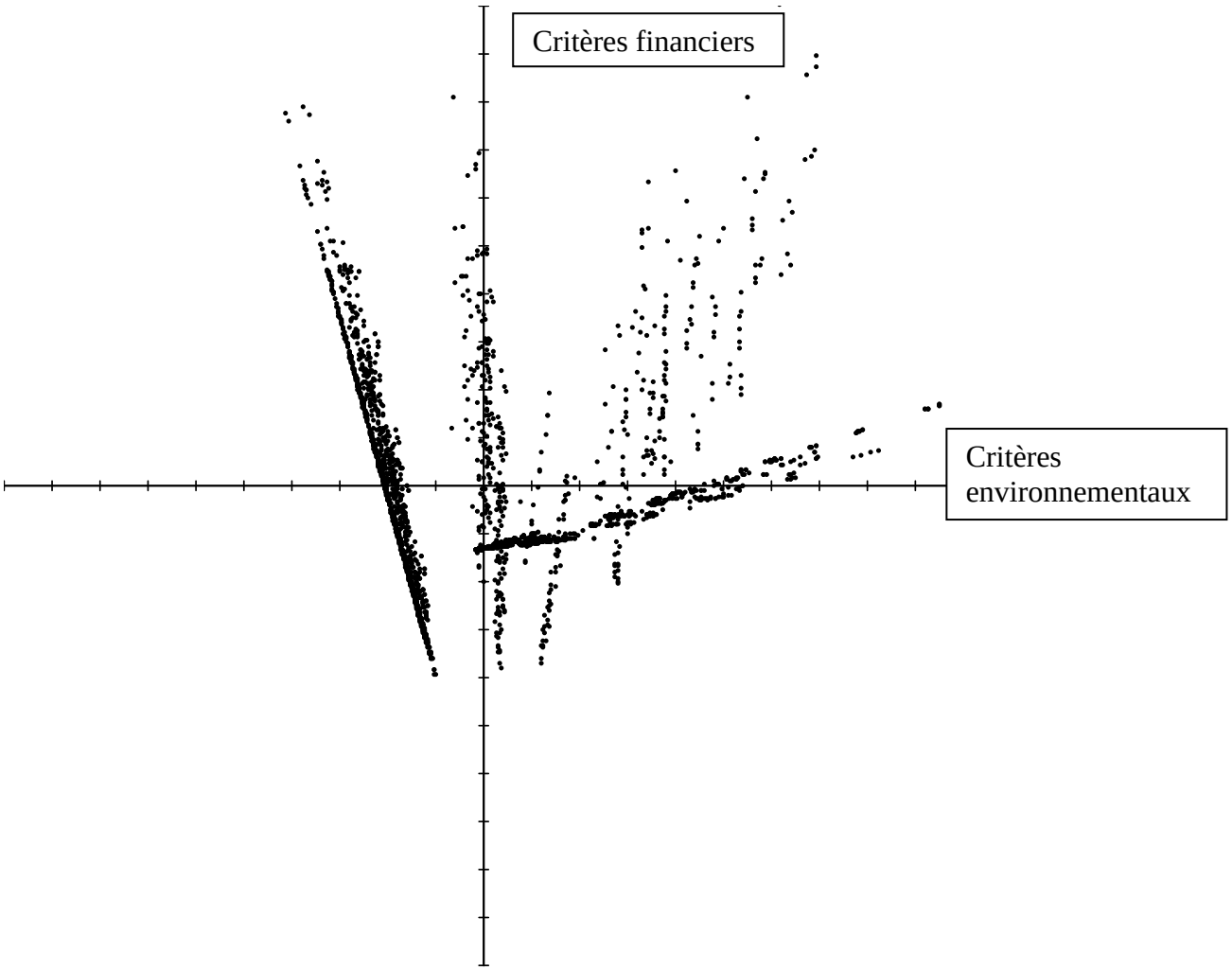



Figure 55 : Représentation des 2560 configurations

Le nombre de configurations est très important et la figure 55 montre que certaines configurations semblent se regrouper. Mais aux vues du nombre de simulations et paramètres à prendre en compte, nous avons décidé de les traiter progressivement en définissant un plan d'expériences. Nous allons à présent présenter ce plan.

### I.2.2 Plan d'expériences

Nous étudions les 2560 configurations de manière progressive. Nous nous intéressons tout d'abord aux configurations homogènes tant au niveau de leur localisation qu'au niveau de l'efficacité de la chaîne logistique. Ensuite, nous analysons les conséquences d'une dégradation de la localisation puis celles d'une dégradation de l'efficacité. Enfin, nous examinerons les configurations à localisation quelconque. Notre plan d'expériences est le suivant :

**configurations homogènes**

- les 16 configurations lll à efficience homogène pour les quatre produits,
- les 32 configurations lll et rrr à efficience homogène pour les quatre produits,
- les 64 configurations à localisation et efficience homogènes pour les quatre produits,

**configurations à localisation dégradée**

- les 22 configurations AAA à localisation dégradée pour un produit,
- les 88 configurations AAA à localisation dégradée pour quatre produits,
- les 352 configurations à localisation dégradée, efficience homogène pour les quatre produits,

**configurations à efficience dégradée**

- les 8 configurations lll à efficience dégradée pour un produit,
- les 32 configurations lll à efficience dégradée pour quatre produits,
- les 160 configurations à localisation homogène, efficience dégradée pour quatre produits,

**autres configurations**

- les 64 configurations AAA à localisation quelconque pour un produit
- les 128 configurations à efficience homogène en A et D, à localisation quelconque pour un produit
- les 512 configurations à efficience homogène en A et D, localisation quelconque pour les quatre produits

# Chapitre II LES CONFIGURATIONS HOMOGENES

II. 1. Efficacité homogène, une seule localisation, quatre produits.....
II.1.1 Analyse de la variance.....
II. 2. Efficacité homogène, localisation lll-rrr, quatre produits.....
II. 3. Efficacité homogène, localisation homogène, quatre produits.....

## II. 1. **Efficacité homogène, une seule localisation, quatre produits**

Afin d'évaluer l'influence des efficacités et des produits, nous avons effectué 16 simulations avec une seule localisation lll. Elles sont listées dans le tableau 26 :

| produit 1 | produit 2 | produit 3 | produit 4 |
|---|---|---|---|
| •AAA<br>•BBB<br>•CCC<br>•DDD | •AAA<br>•BBB<br>•CCC<br>•DDD | •AAA<br>•BBB<br>•CCC<br>•DDD | •AAA<br>•BBB<br>•CCC<br>•DDD |

Tableau 26 : 16 simulations à localisation constante

Les résultats de la classification par la méthode des centres mobiles sont donnés au tableau 27 et à la figure 55 selon :

- les émissions dues au stockage en tonnes équivalent $CO_2$
- les émissions dues au transport en tonnes équivalent $CO_2$.

Cette méthode partitionne des individus en classes homogènes, sur la base de leur description par un ensemble de variables quantitatives. Nous nous donnons une partition de départ et chaque classe est représentée par son centre de gravité. Nous construisons alors une nouvelle partition en affectant chaque point au plus proche des centres précédents, et nous itérons le procédé...

| | en tonne équivalent $CO_2$ | |
|---|---|---|
| **CLASSIFICATION** | **émission dues au stockage** | **émissions dues au transport** |
| PRODUIT 2 | **0,01** | **0,00** |
| PRODUIT 4 CCC+DDD | **2952,84** | **330,33** |
| PRODUIT 3 + PRODUIT 4 (AAA+BBB) | **1812,30** | **95,00** |
| PRODUIT 1 | **23,39** | **22,50** |

Tableau 27 : Résultats des 16 simulations à localisation constante et efficacité homogène en tonne équivalent $CO_2$

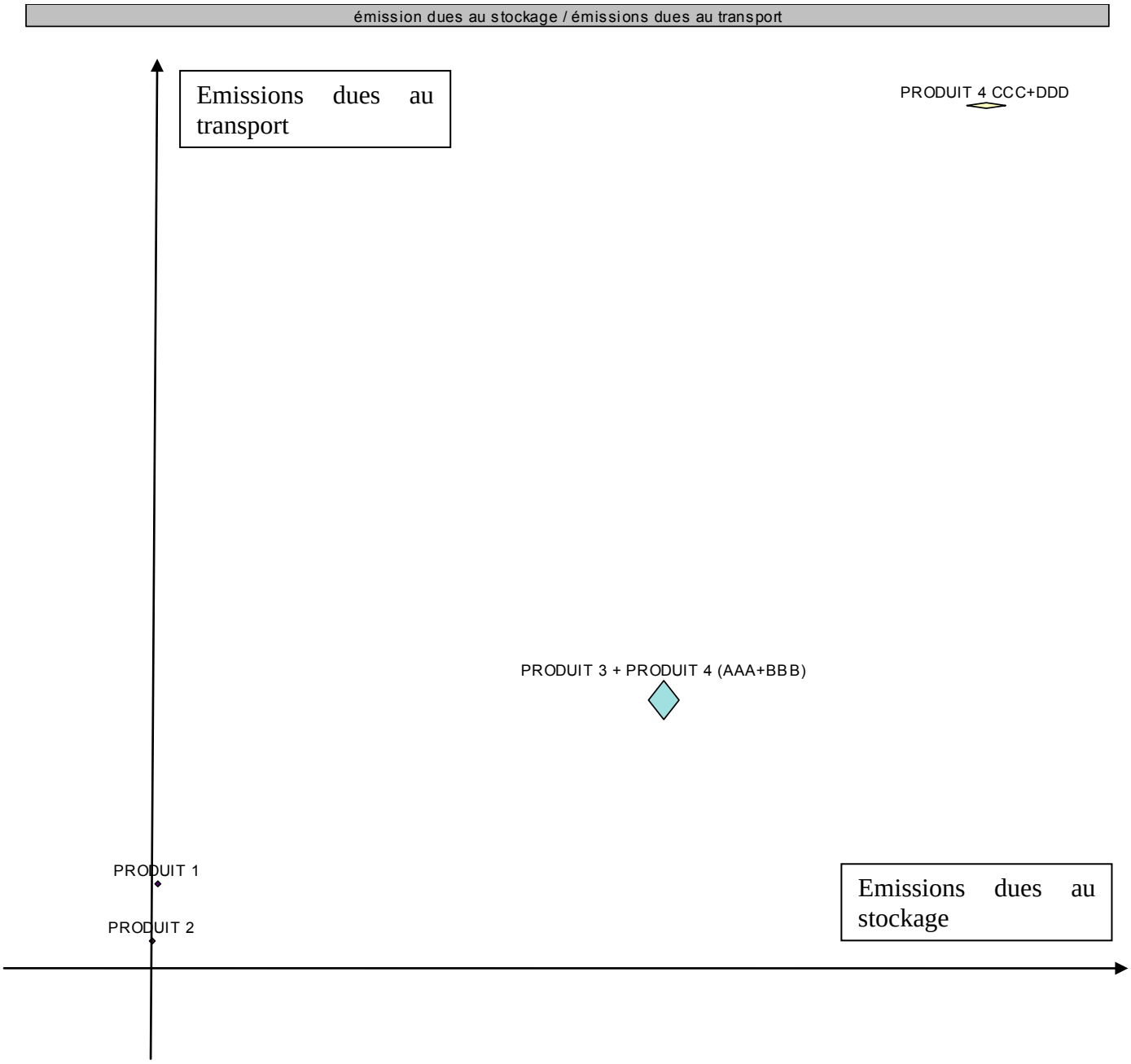



Figure 56 : Classification par la méthode des centres mobiles des 16 configurations selon les émissions

La surface des losanges est proportionnelle aux écarts-types.

D'après le tableau 27 et la figure 56, comme attendu, le type de produit est influent. Le produit 2 est moins lourd que le produit 1 donc il émet moins durant le transport.

Les résultats pour le produit 4 différent selon le choix de l'efficacité. Ils sont équivalents à ceux du produit 3 si les configurations d'efficacité sont AAA et BBB. De même, les deux configurations CCC et DDD se situent dans la même classe. Il est donc intéressant de se poser la question de la pertinence de garder les quatre efficacités lors de la dégradation de celle-ci. Nous pourrions garder uniquement AAA (pour des résultats AAA et BBB) et DDD (pour des résultats CCC et DDD). Nous le confirmerons en analysant d'autres résultats de simulations.

### II.1.1 Analyse de la variance

L'analyse de la variance ou ANOVA (ANalysis Of VAriance) est un test statistique permettant de valider ou d'invalider une hypothèse avec un facteur. En réalisant une analyse de la variance sur le type de produits sur les 2560 configurations, nous confirmons l'importance du type de produits. Les critères évalués sont : émissions dues au stockage, émissions dues au transport, nombre de kilomètres, nombre de produits stockés.

| type de produit | émissions dues au stockage | émissions dues au transport | nombre de km | nombre de produits stockés |
|---|---|---|---|---|
| **1** | 26.13 | 2952.50 | 29210818.61 | 2025.33 |
| **2** | 0.01 | 0.00 | 29210818.61 | 2025.33 |
| **3** | 1921.94 | 4683.49 | 22641476.72 | 1910.29 |
| **4** | 3083.98 | 41554.08 | 22641476.72 | 1910.29 |
| **TOTAL** | 1258.01 | 12297.52 | 25926147.66 | 1967.81 |

Tableau 28 : Résultats de l'ANOVA sur le type de produits avec 2560 configurations

Le tableau 28 confirme que les émissions sont très différentes selon le type de produits. Les nombres moyens de kilomètres et de produits stockés sont quasi constants car ils ne dépendent pas du type de produits.

## II. 2. **Efficacité homogène, localisation lll-rrr, quatre produits**

Nous élargissons les configurations précédentes à la localisation rrr et nous considérons les deux paramètres suivants pour l'analyse par la méthode des centres mobiles : émissions dues au transport et au stockage. Nous obtenons alors les résultats du tableau 29 et de la figure 57:

| | en tonne équivalent $CO_2$ | |
|---|---|---|
| **CLASSIFICATION** | **émission dues au stockage** | **émissions dues au transport** |
| produit 4 lll CCC+DDD | **3174,41** | **333,50** |
| produit 4 rrr | **2946,04** | **1771,00** |
| produit 4 lll AAA+BBB et produit 3 rrr CCC+DDD | **2201,87** | **215,40** |
| produits 1 et 2 | **12,09** | **36,13** |
| produit 3 lll + rrr AAA+BBB | **1581,04** | **97,20** |

Tableau 29 : Résultats des 32 simulations a localisations LLL et RRR en tonne équivalent $co_2$

On remarque encore l'importance de l'efficacité pour les produits 3 et 4. Ces résultats nous confirment la similitude des résultats pour les configurations AAA et BBB, CCC et DDD.

Les produits 1 et 2 se situent dans la même classe. Leurs émissions sont faibles par rapport aux deux autres produits (tableau 29).

La figure 57 illustre ces résultats.

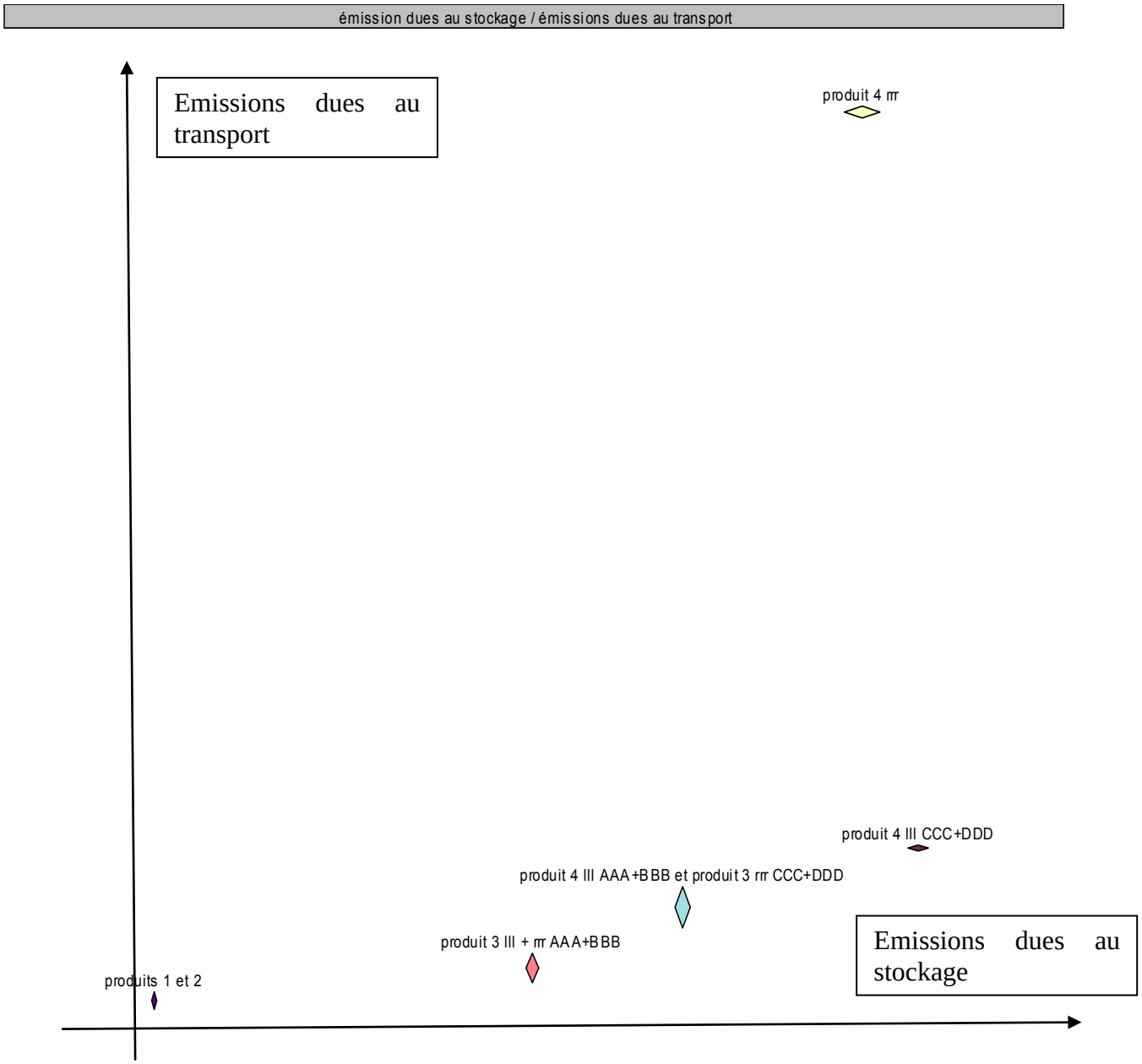



Figure 57 : Classification par la méthode des centres mobiles des 32 configurations

La surface des losanges est proportionnelle aux écarts-types. L'axe vertical représente les émissions dues au transport et l'axe horizontal celle dues au stockage.

Pour approfondir ces résultats, nous réalisons une analyse en composantes principales avec quatre critères :
- critères environnementaux : émissions dues au transport et au stockage,
- critères financiers : nombre de kilomètres parcourus, nombre de produits stockés.

La variance est expliquée par les composantes suivantes :

| | f1 | f2 | f3 | f4 |
|---|---|---|---|---|
| Valeur propre | 2,035 | 0,999 | 0,802 | 0,165 |
| % expliqué | 45.75% | 26.36% | 21.79% | 6.10% |
| % cumulé | 45.75% | 72.11% | 93.90% | 100,00% |

Tableau 30 : Variance expliquée pour les 32 configurations

D'après le critère de niveau d'informations et de Kaiser, nous retiendrions les deux premières valeurs propres car elles représentent 76% de l'information et sont supérieures ou égales à un. Mais, si nous effectuons un scree test (figure 58), la rupture de pente se situe après la deuxième valeur propre. Nous gardons donc les deux premières valeurs propres et analysons la carte factorielle correspondante.

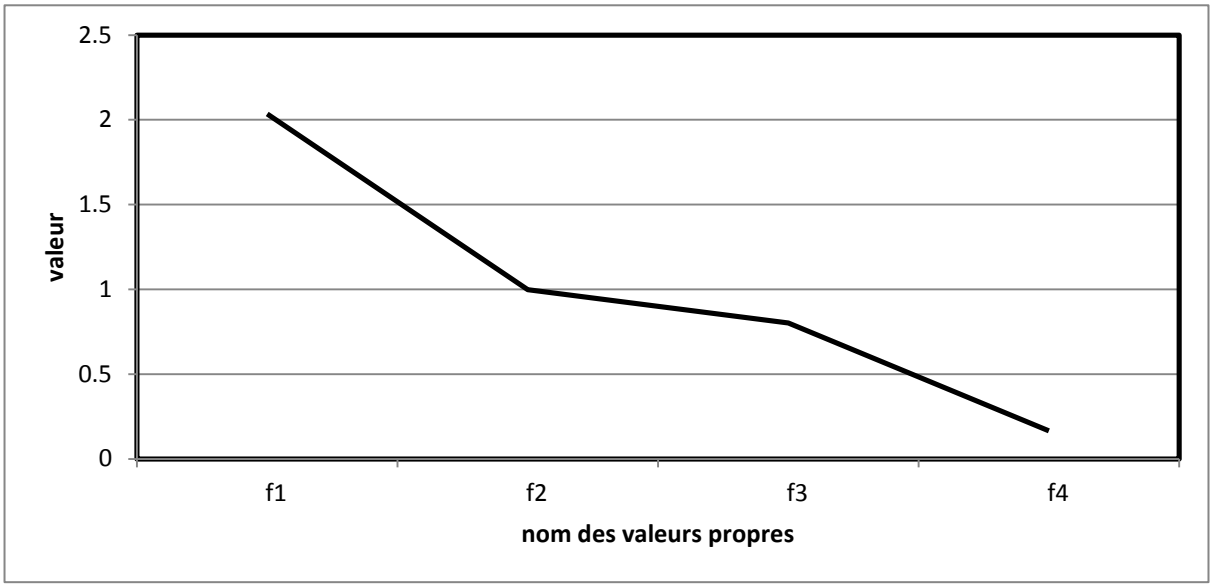



Figure 58 : Représentation des valeurs propres

Les contributions aux deux axes sont alors les suivantes (tableau 31) :

| | Axe 1 (+45.75%) | | Axe 2 (+26.36%) | |
|---|---|---|---|---|
| CONTRIBUTIONS POSITIVES | émissions dues au transport | +43,0% | nombre de produits stockés | +42,0% |
| | émissions dues au stockage | +34,0% | nombre de km | +33,0% |
| | | | | |
| CONTRIBUTIONS NEGATIVES | | | émissions dues au stockage | -18,0% |
| | | | émissions dues au transport | -4,0% |
| | | | | |

Tableau 31 : Contributions aux deux axes

Le premier axe représente donc les émissions d'équivalent $CO_2$ et contient 45.75% des informations. Nous pourrions le nommer "émissions d'équivalent $CO_2$". Les émissions sont en effet moins bien représentées sur l'autre axe. Le second axe symbolise les facteurs financiers car les contributions négatives n'ont pas un pourcentage assez élevé pour être significatives. La représentation des deux axes donne les résultats illustrés par la figure 59 et le tableau 32 :

en tonne équivalent $CO_2$

| CLASSIFICATION | émission dues au stockage | émissions dues au transport | nombre de km | nombre de produits stockés |
|---|---|---|---|---|
| CCC rrr | 1278,35 | 530,00 | 5783700,00 | 2058,00 |
| AAA III | 889,95 | 98,00 | 565370,00 | 1433,00 |
| AAA+DDD rrr 1+2+3 | 626,26 | 104,33 | 5690800,00 | 1953,50 |
| BBB rrr | 1101,85 | 511,25 | 5577900,00 | 1774,00 |
| DDD III 3+4 | 2755,94 | 183,00 | 561030,00 | 2230,00 |
| CCC III | 1204,57 | 98,75 | 570430,00 | 1939,00 |
| DDD+AAA rrr 4 | 2974,51 | 1772,50 | 5690800,00 | 1953,50 |
| DDD III 1+2 | 14,39 | 11,00 | 561030,00 | 2230,00 |
| BBB III | 1023,72 | 95,25 | 550010,00 | 1648,00 |

Tableau 32 : Classification des 32 configurations par ACP

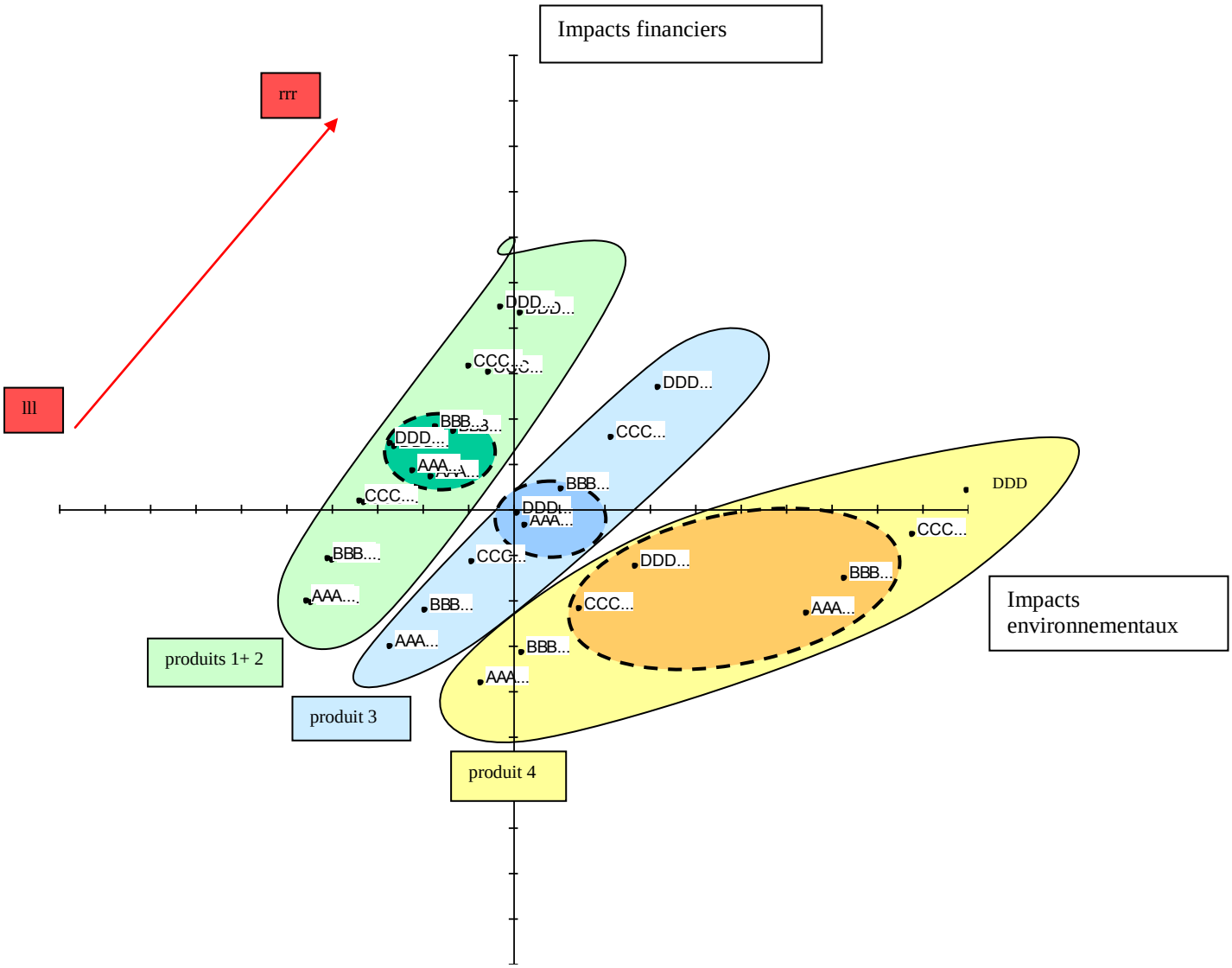



Figure 59 : Représentation des 32 configurations par ACP sur les deux premiers axes selon l'efficience

La figure 59 et le tableau 32 apportent un complément d'information à l'analyse deux critères :

- les localisations lll émettent moins que les localisations rrr et ont un impact financier moindre ( en rouge). Les produits 1 et 2 peuvent être associés. Par contre, nous voyons une nette différence de comportement pour le produit 4. Le produit 4 en localisation lll émet autant que les autres types de produit en localisation rrr.

- le type de produits a une très forte influence environnementale puisque nous voyons que les produits 4 ( en jaune) ont des résultats très élevés sur l'axe des facteurs environnementaux.

- l'efficacité des entreprises influence les facteurs financiers et les facteurs environnementaux. Quand l'efficacité se dégrade, les résultats se décalent vers le haut et la droite. Les émissions et les coûts financiers augmentent donc avec la dégradation des efficacités.

- un résultat particulier est à noter à la figure 59 en pointillé. Quel que soit le type de produit 1, 2 ou 3, la configuration AAA rrr est équivalente à la configuration DDD lll. Pour le produit 4, le niveau de stock et le nombre de kilomètres des configurations CCC lll et DDD lll sont équivalents à ceux des configurations AAA rrr et BBB rrr. Par contre, les émissions d'équivalent $CO_2$ sont bien plus fortes pour la configuration en rrr qu'en lll.

Pour compléter ces 32 configurations, nous étendons à présent les simulations aux localisations continentales et globales.

## II. 3. **Efficacité homogène, localisation homogène, quatre produits**

Nous élargissons à présent les configurations aux localisations ccc et ggg. Nous obtenons les résultats du tableau 33 et de la figure 60 grâce à la méthode des centres mobiles sur les émissions :

en tonne équivalent $CO_2$

| CLASSIFICATION | émission dues au stockage | émissions dues au transport |
|---|---|---|
| produit 4 ccc | 3501.99 | 57253.80 |
| produit 4 ggg | 3595.44 | 104945.00 |
| produits 1 et 3 en ccc-ggg | 1189.38 | 6887.20 |
| produit 2 et produit 1 en lll-rrr | 9.02 | 156.52 |
| produit 4 rrr et lll en CCC-DDD | 3022.16 | 1291.83 |
| produit 3 lll-rrr et produit 4 lll en AAA-BBB | 1891.45 | 156.30 |
| TOTAL | 1303.28 | 11213.11 |

Tableau 33 : Résultats des 64 simulations à localisation et efficacité homogènes en tonne équivalent $CO_2$

On remarque que quelle que soit la configuration d'efficacité, le produit 4 est toujours plus émetteur que les autres produits. De plus, la localisation est très significative car quelles que soient les efficacités, les localisations ccc et ggg se détachent en termes d'émissions.
Le produit 3 est plus émetteur en terme de transport que le produit 4 dès lors que le produit 3 est en configuration ccc et ggg et le produit 4 en lll et rrr. Une chaîne logistique fabriquant des

produits 3 avec des localisations continentale ou globale est donc plus polluante qu'une chaîne logistique produisant des produits 4 avec des localisations locale ou régionale.
Le produit 1 rejoint le produit 3 sur les configurations ccc et ggg et le produit 2 sur les configurations lll et rrr.
Nous constatons également que pour le produit 4 les configurations AAA-BBB et CCC-DDD se comportent de la même manière. Ceci confirme notre choix de ne dégrader les efficacités que pour A et D.

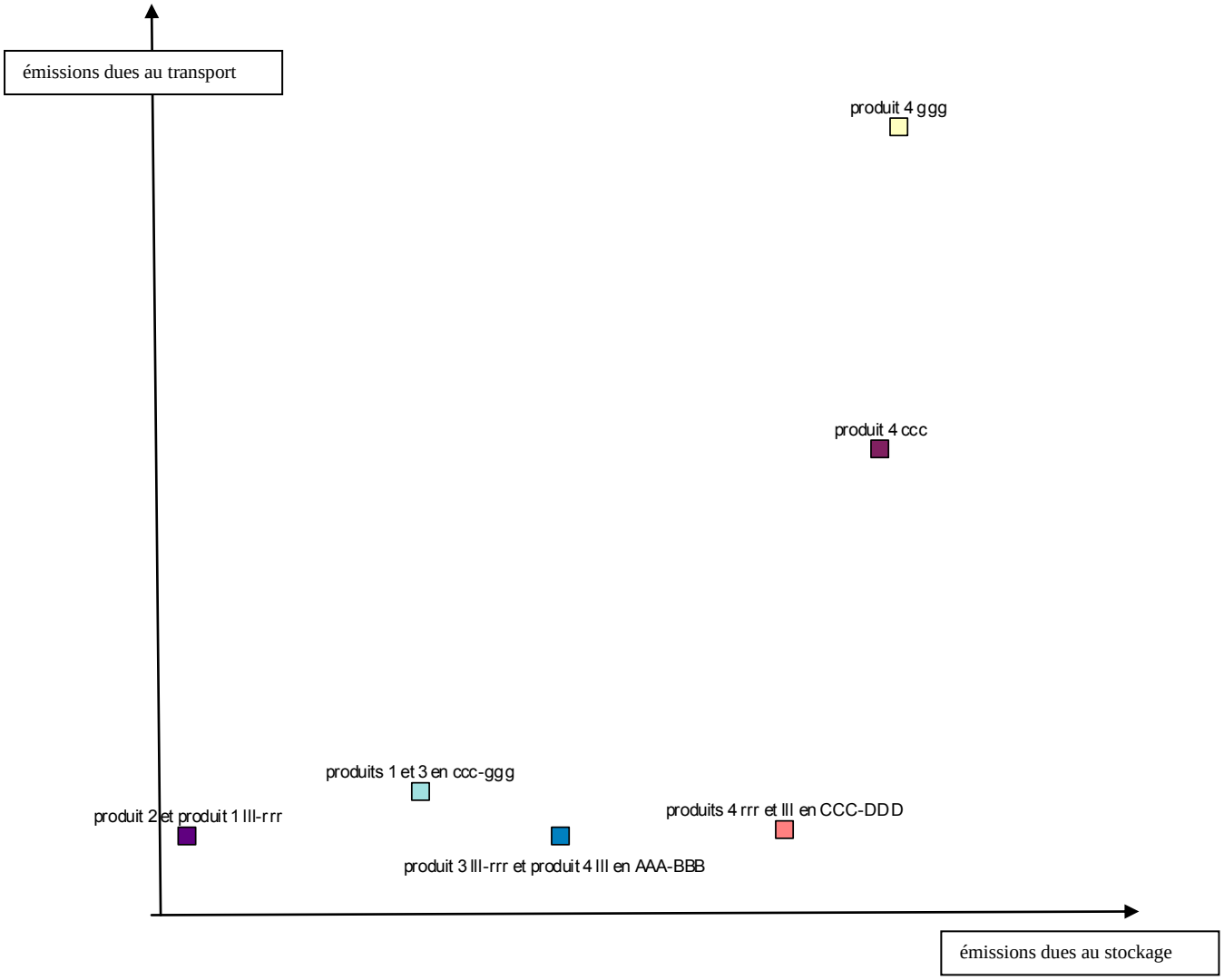



Figure 60 : Classification des 64 configurations selon les émissions

Pour compléter cette analyse, nous réalisons une analyse en composantes principales sur quatre critères : émissions dues au stockage et au transport, nombre de kilomètres parcourus et nombre de produits stockés.
La variance est expliquée ci-dessous en tableau 34:

| | f1 | f2 | f3 | f4 |
|---|---|---|---|---|
| Valeur propre | 1,930 | 1,194 | 0,520 | 0,355 |
| % expliqué | 48,254% | 29,91% | 13,012% | 8,878% |
| % cumulé | 48,254% | 78,164% | 91,176% | 100,000% |

Tableau 34 : Valeurs propres des 64 configurations homogènes

Les deux premières valeurs propres sont supérieures à 1 et expliquent 78% de la variance.

En considérant les deux valeurs propres, les contributions aux deux axes sont les suivantes :

| | Axe 1 (+48.25%) | | Axe 2 (+29.91%) | |
|---|---|---|---|---|
| CONTRIBUTIONS POSITIVES | émission dues au stockage | +34,0% | nombre de km | +37,0% |
| | émissions dues au transport | +20,0% | émissions dues au transport | +34,0% |
| | | | | |
| CONTRIBUTIONS NEGATIVES | nombre de produits stockés | -28,0% | | |
| | nombre de km | -16,0% | | |
| | | | | |

Tableau 35 : Contributions aux axes 1 et 2

L'axe 1 oppose les critères environnementaux aux critères financiers. L'axe 2 est l'axe des critères financiers. Voici la projection des 64 configurations sur ces deux axes en figure 61.

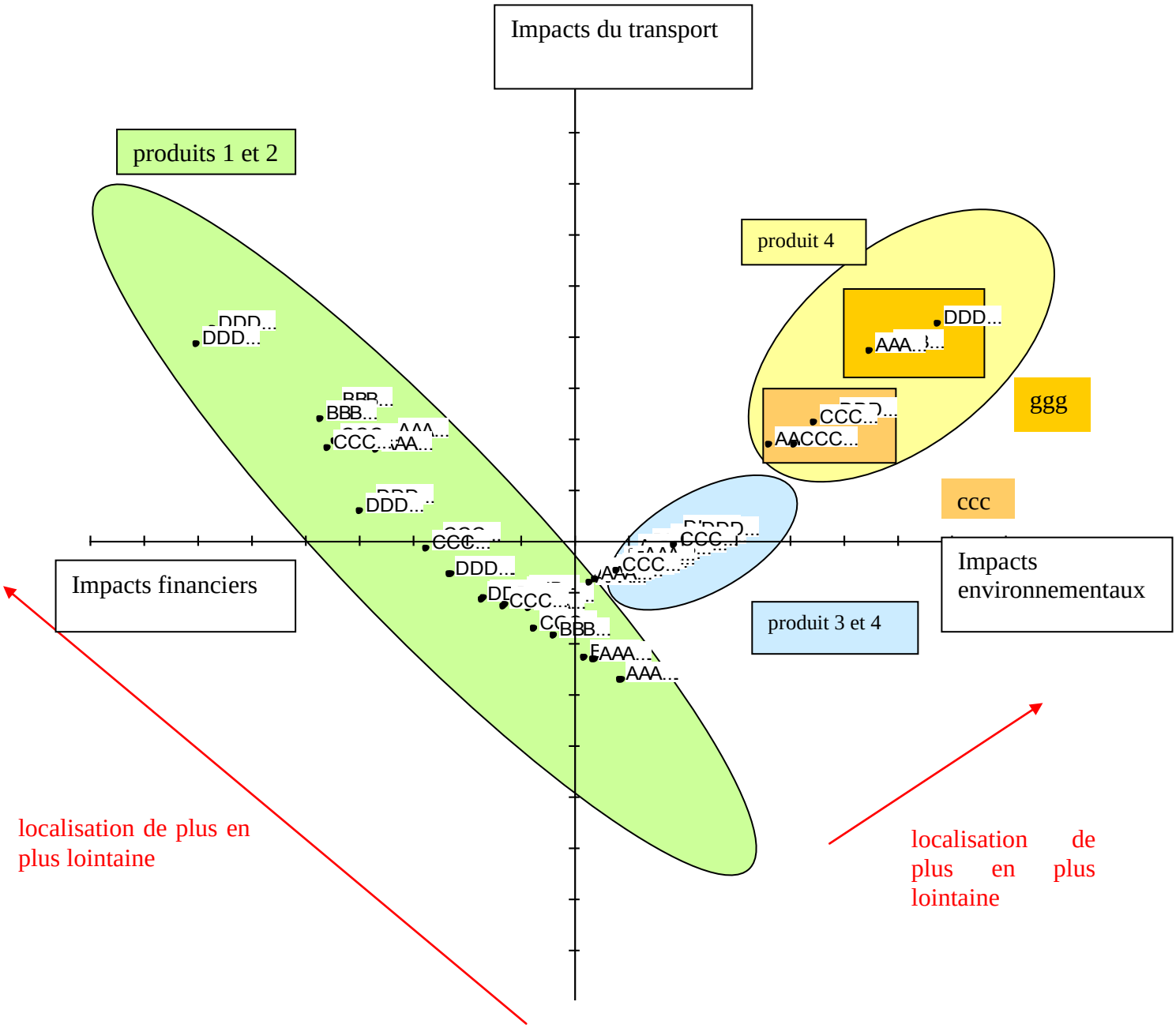



Figure 61 : Représentation des 64 configurations par ACP sur l'axe 1 et 2

Les produits 3 et 4 émettent de manière très significative. Plus l'efficacité est faible et plus la localisation est lointaine, plus ils émettent. Les résultats des configurations ggg sont nettement supérieurs en terme d'émissions a contrario des configurations lll et rrr. Les résultats des produits 3 et 4 sont très influencés par les émissions. Nous voyons également que plus l'efficacité se dégrade, plus les résultats sont élevés.

Les résultats globaux des produits 1 et 2 appartiennent à la même classe. Plus la localisation est lointaine et l'efficacité faible plus les critères financiers sont élevés.

A partir de ces configurations homogènes, nous concluons que le type de produits et les configurations de localisation sont très impactantes. Pour les efficacités, nous confirmons le choix de considérer ensemble les configurations AAA et BBB puis CCC et DDD dans les dégradations des efficacités. Nous allons à présent simuler des configurations à localisation dégradée.

# Chapitre III LES CONFIGURATIONS A LOCALISATION DEGRADEE

III. 1. Configurations AAA, un produit, localisation dégradée……
III. 2. Configurations AAA, 4 produits, localisation dégradée……
III. 3. Configurations à efficacité homogène, quatre produits, localisation dégradée.....

## III. 1. **Configurations AAA, un produit, localisation dégradée**

Les 22 configurations à localisation dégradée que nous étudions à présent sont les suivantes :

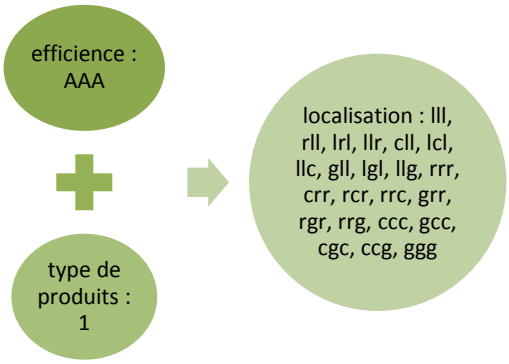



Figure 62 : Dégradation des localisations

Nous effectuons une analyse en composantes principales sur les quatre critères suivants: émissions dues au stockage et au transport, nombre de produits stockés, nombre de kilomètres.

La variance est expliquée ci -dessous :

| | f1 | f2 | f3 | f4 |
|---|---|---|---|---|
| Valeur propre | 2,934 | 1,013 | 0,052 | 0,000 |
| % expliqué | 91.60% | 8.17% | 0.23% | 0,000% |
| % cumulé | 91.60% | 99.77% | 100,000% | 100,000% |

Tableau 36 : Valeurs propres

Nous considérons d'après les trois critères de l'analyse que les deux premières valeurs propres sont suffisantes. Les contributions aux deux axes sont les suivantes :

| | Axe 1 (+91.60%) | | Axe 2 (+8.17%) | |
|---|---|---|---|---|
| CONTRIBUTIONS POSITIVES | émissions dues au transport | +27,0% | nombre de km | +72,0% |
| | émission dues au stockage | +26,0% | | |
| | | | | |
| CONTRIBUTIONS NEGATIVES | | | nombre de produits stockés | -14,0% |
| | | | émission dues au stockage | -13,0% |
| | | | | |

Tableau 37: Contributions aux axes

Le premier axe représente les émissions donc les critères environnementaux et l'axe 2 oppose les critères financiers. Sur ces deux axes, les projections sont les suivantes :

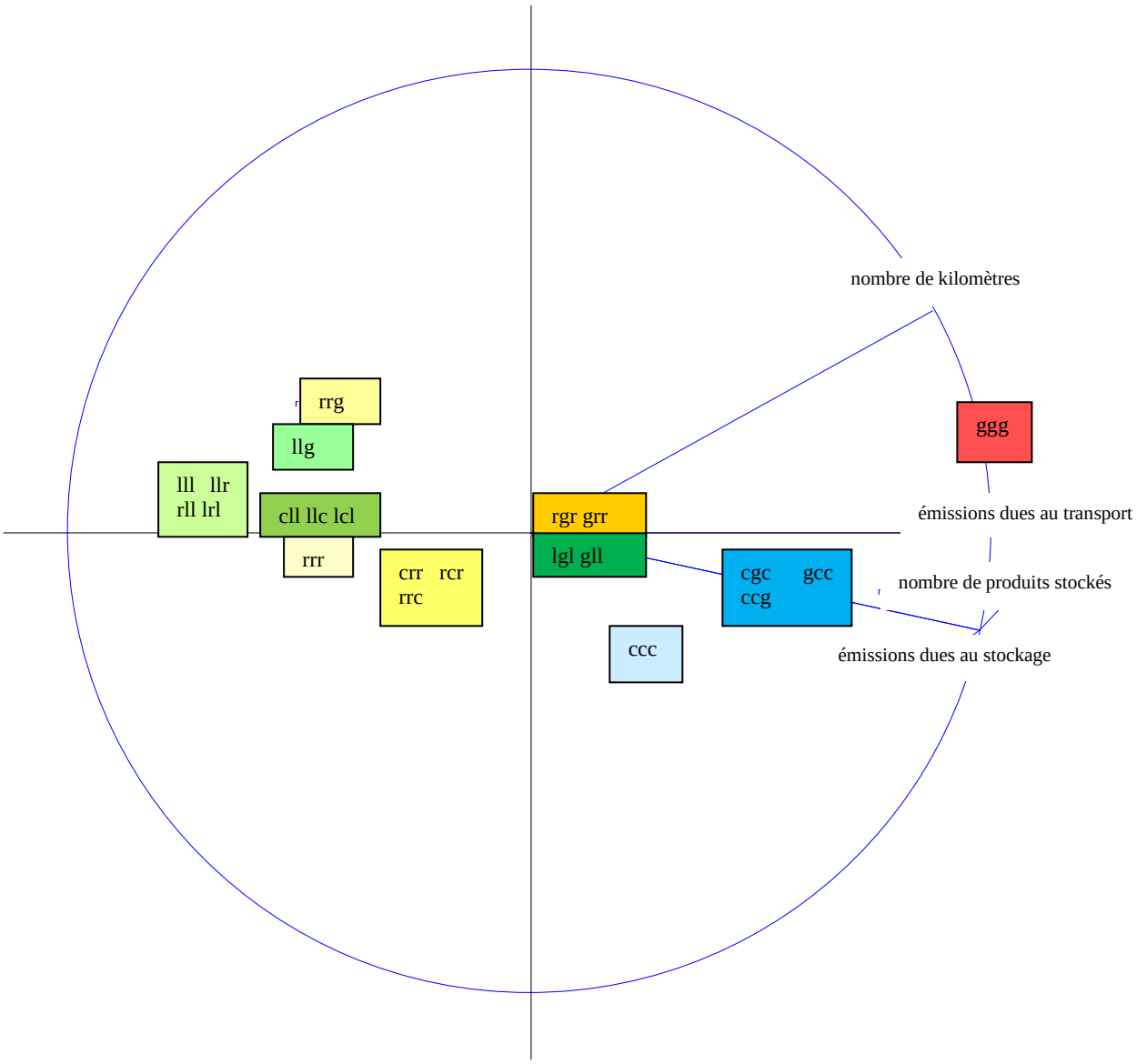



Figure 63: Représentation des 22 configurations sur les axes 1 et 2

Sur la figure 63, nous confirmons que les configurations en lll et ses dégradations avec une localisation r émettent moins que les autres configurations. De même, la configuration globale est celle qui émet le plus.

Par contre, les autres classes méritent des explications car les résultats ne sont pas forcément triviaux. Les configurations dégradées en c de lll sont équivalentes à une configuration entièrement régionale. Si, nous nous intéressons aux configurations continentales, nous voyons que dès que celle-ci est dégradée avec une localisation globale le nombre de kilomètres et les émissions augmentent quelle que soit la place de la dégradation de même la configuration régionale et ses dégradations avec une configuration continentale. Les dégradations des configurations locale et régionale avec une configuration globale apportent une information intéressante : les configurations où la localisation globale est en position finale sont moins émettrices que les configurations où cette localisation est en amont.

en tonne équivalent $CO_2$

| CLASSIFICATION | émission dues au stockage | émissions dues au transport | nombre de km | nombre de produits stockés |
|---|---|---|---|---|
| rrg llg | 19,16 | 606,00 | 28867835,00 | 1485,00 |
| grg grr lgl gll | 21,75 | 3796,00 | 34620397,50 | 1685,25 |
| cll llc lcl rrr | 20,04 | 1092,25 | 6318787,50 | 1553,75 |
| lll llr rll lrl | 18,88 | 47,50 | 1840347,50 | 1463,00 |
| ggg | 24,57 | 7379,00 | 92113600,00 | 1904,00 |
| cgc gcc ccg | 23,75 | 5187,67 | 42784853,33 | 1840,33 |
| crr rcr rrc | 20,89 | 1427,67 | 9879180,00 | 1619,33 |
| ccc | 23,05 | 4101,00 | 18393280,00 | 1786,00 |

Tableau 38: Classification des 22 configurations par ACP

Nous réalisons un focus sur ces configurations à la figure 64, zoom de la figure 63. Nous voyons alors nettement d'après le tableau 38 que les configurations ayant un g en dernière position émettent environ 6 fois moins que les mêmes configurations ayant un g positionné en première ou deuxième position. De même, leur nombre de kilomètres est moindre. Nous pouvons l'expliquer de la manière suivante. Nous avons paramétré notre modèle pour un taux de service de 100%. Les stocks et les niveaux de sécurité de ceux-ci sont paramétrés en conséquence. Lorsque la localisation globale se situe en première ou seconde position, les transports express, plus émetteurs que les transports classiques, se déclenchent pour livrer la dernière entreprise afin que celle-ci puisse livrer à l'heure le client final. Lorsque le client final se situe très loin de la dernière entreprise, nous pouvons émettre l'hypothèse suivante. S'il y a rebuts, les commandes de produits se répercutent sur les entreprises précédentes. Celles-ci sont susceptibles d'accuser des retards. Si leur localisation n'est pas continentale ou globale, il n'y a pas de transports express. Les stocks de la dernière entreprise en localisation globale sont quant à eux dimensionnés pour assurer un taux de service de 100%. Si quelques transports express peuvent se déclencher, ils sont cependant marginaux. D'autres hypothèses de départ auraient pu être choisies et feront l'objet d'un développement dans les perspectives de recherches.

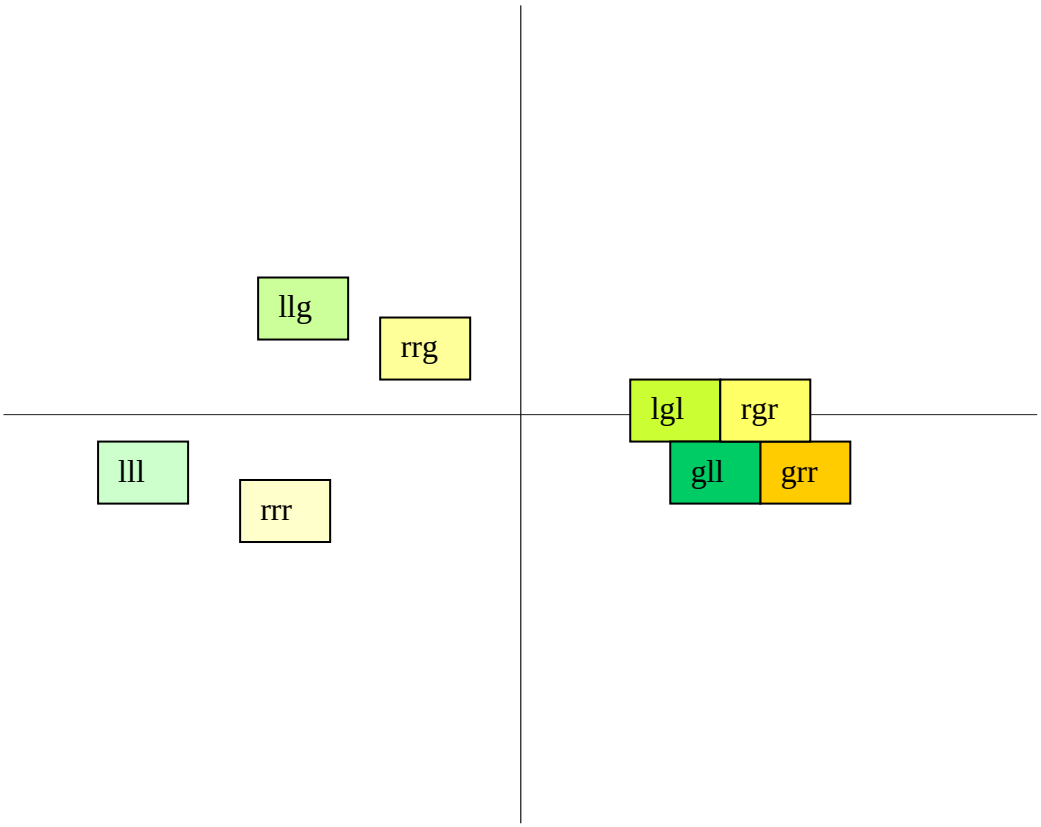



Figure 64 : Zoom sur 8 configurations sur les axes 1 et 3

Nous élargissons ces 22 configurations aux quatre produits possibles.

## III. 2. **Configurations AAA, 4 produits, localisation dégradée**

Nous reprenons donc les 22 configurations précédentes en les appliquant aux quatre types de produits. Si nous effectuons une classification par analyse des composantes principales, nous obtenons les résultats suivants (tableaux 39 à 41 et figure 65). Nous concluons que les deux premières valeurs propres, d'après les trois critères nécessaires et suffisants (variance, scree test, test de Kaiser), sont assez représentatives comme l'indique le tableau 39.

| | f1 | f2 | f3 | f4 |
|---|---|---|---|---|
| Valeur propre | 2,035 | 1,323 | 0,530 | 0,112 |
| % expliqué | 50,860% | 33,05% | 13,25% | 2,84% |
| % cumulé | 50,860% | 83,91% | 97,16% | 100,00% |

Tableau 39 : Valeurs propres

Nous gardons ainsi deux axes dont les contributions sont les suivantes :

| | Axe 1 (+50.86%) | | Axe 2 (+33.05%) | |
|---|---|---|---|---|
| CONTRIBUTIONS POSITIVES | nombre de produits stockés | +35,0% | nombre de km | +56,0% |
| | émissions dues au stockage | +33,0% | nombre de produits stockés | +12,0% |
| | | | | |
| CONTRIBUTIONS NEGATIVES | | | émissions dues au transport | -17,0% |
| | | | émissions dues au stockage | -14,0% |
| | | | | |

Tableau 40 : Contributions aux axes

L'axe 1 caractérise le stockage tandis que l'axe 2 oppose les facteurs financiers aux facteurs environnementaux. Après projection sur ces axes, nous répartissons les 88 configurations entre cinq classes. Le tableau 41 indique leurs caractéristiques :

| | en tonne équivalent $CO_2$ | | | |
|---|---|---|---|---|
| **CLASSIFICATION** | **émissions dues au stockage** | **émissions dues au transport** | **nombre de km** | **nombre de produits stockés** |
| produits 1+2 dégradation en c de III-rrr | **10,21** | **618,00** | **7844670,00** | **1581,86** |
| produits 1+2 ccc, produits 3+4 | **1930,06** | **16903,59** | **18393280,00** | **1786,00** |
| produits 1+2 ggg | **12,29** | **3689,50** | **92113600,00** | **1904,00** |
| prouits 1+2 dégradation en r de III | **9,48** | **27,30** | **2250590,00** | **1469,60** |
| produits 1+2 dégradation en g de III-r rr-ccc | **11,13** | **1928,81** | **37189631,25** | **1724,88** |

Tableau 41 : Classification des 88 configurations par ACP

Nous représentons ces cinq classes sur la figure 65. Nous constatons que le type de produits est très influent. Les produits 1 et 2 sont dans les mêmes classes. Puis plus la dégradation est forte plus les classes se translatent vers le haut et la droite. Les résultats des émissions des produits 3 et 4 sont très importants et prennent le dessus par rapport aux autres facteurs. Un point est à noter : la présence dans la même classe des produits 1 et 2 en configuration ccc et des produits 3 et 4. Nous pouvons expliquer ce point par le nombre de kilomètres parcourus en camion et non en bateau comme dans la configuration ggg. En effet, le bateau émet du $CO_2$ en quantité moindre par rapport au camion. Le type de produits ne compense pas cette différence. Par exemple, une configuration cgc avec le produit 1 émettra donc moins en terme d'émissions dues au transport qu'une configuration ccc. En simplifiant, nous aurions 8000 kilomètres multipliés par un facteur d'émissions de 3.57 soit 28 560 contre 1600 kilomètres par 74.90 soit 119 840.

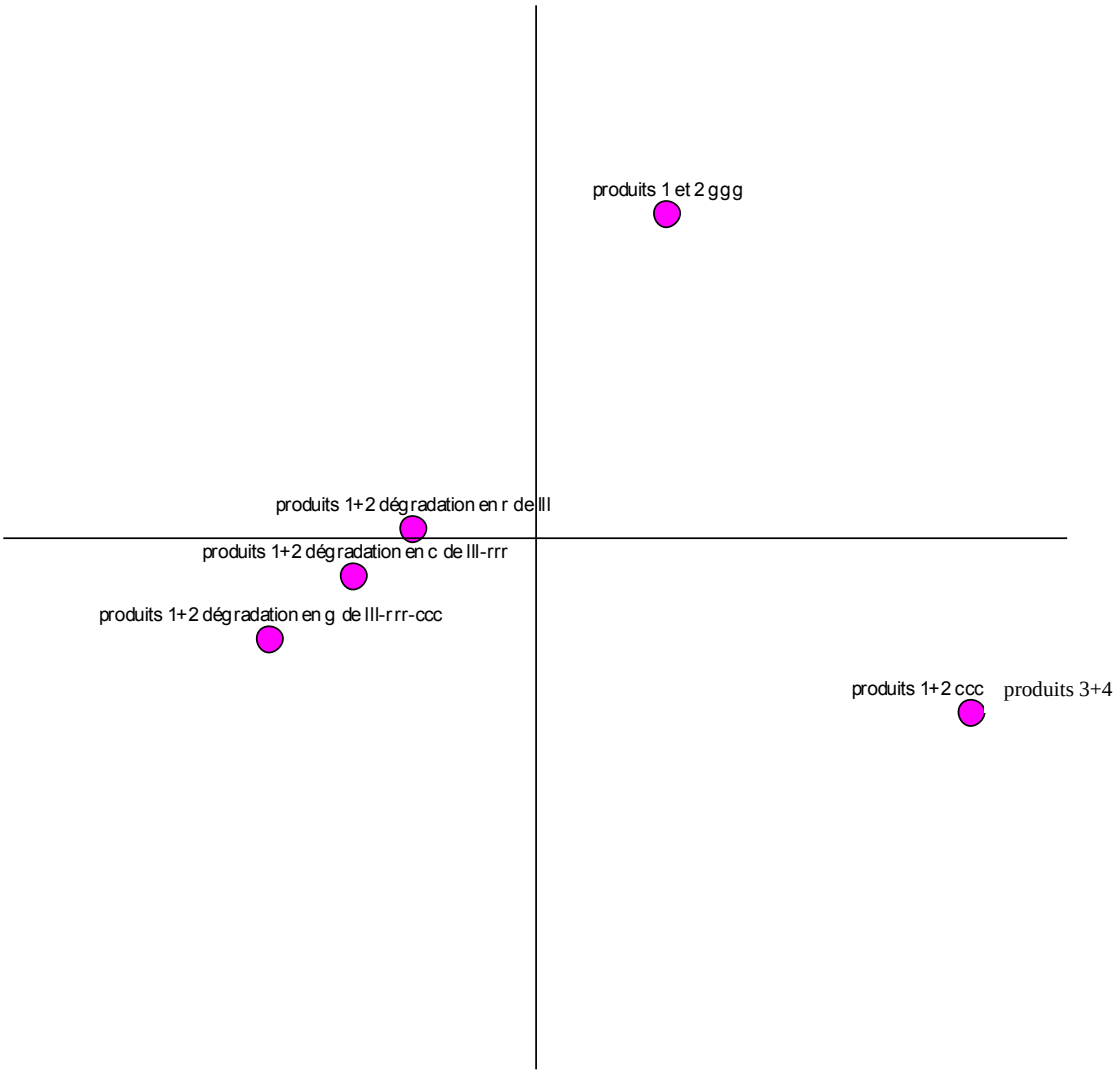



Figure 65 : Représentation des 88 configurations

Nous avons étudié l'influence des produits dans les résultats des configurations à localisation dégradée. Nous allons à présent étudier l'influence de l'efficacité.

## III. 3. **Configurations à efficacité homogène, quatre produits, localisation dégradée**

Nous traitons les 352 simulations avec une classification hiérarchique sur les quatre critères quantitatifs suivants : émissions dues au transport et au stockage, nombre de kilomètres et nombre de produits stockés. Si nous établissons une classification hiérarchique uniquement pour les configurations à efficience AAA et DDD, nous obtenons cinq classes dont les barycentres sont décrits dans le tableau 42.

| Classe | stockage | transport | nombre de km | nombre de produits stockés |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 2455,530 | 17869,135 | 18399018,667 | 1807,831 |
| 2 | 14,796 | 2275,662 | 40642240,000 | 2293,489 |
| 3 | 12,691 | 431,753 | 5857898,636 | 1967,182 |
| 4 | 15,609 | 3665,546 | 92536000,000 | 2419,400 |
| 5 | 12,990 | 954,131 | 30176727,500 | 2013,550 |

Tableau 42 : Barycentres des 5 classes

La figure 66 représente le dendrogramme des 352 configurations.

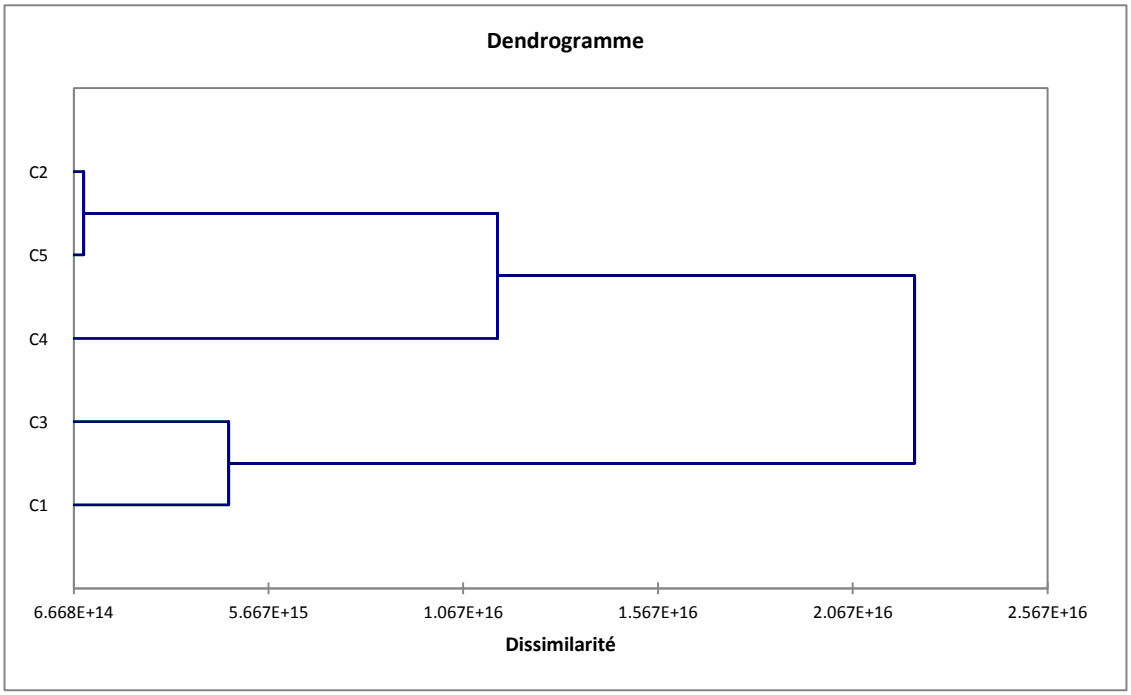



Figure 66 : dendrogramme des 352 configurations

Les classes sont réparties de la manière suivante :

| Classe | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|
| | 1AAAccc | 1AAAccg | 1AAAcll | 1AAAggg | 1AAAgll |
| | 2AAAccc | 2AAAccg | 2AAAcll | 2AAAggg | 2AAAgll |
| | 3AAAccc | 1AAAcgc | 1AAAcrr | 1DDDggg | 1AAAlgl |
| | 4AAAccc | 2AAAcgc | 2AAAcrr | 2DDDggg | 2AAAlgl |
| | 3AAAccg | 1AAAgrr | 1AAAlcl | | 1AAAllg |
| | 4AAAccg | 2AAAgrr | 2AAAlcl | | 2AAAllg |
| | 3AAAcgc | 1AAArgr | 1AAAllc | | 1AAArrg |
| | 4AAAcgc | 2AAArgr | 2AAAllc | | 2AAArrg |
| | 3AAAcll | 1DDDccg | 1AAAlll | | 1DDDlgl |
| | 4AAAcll | 2DDDccg | 2AAAlll | | 2DDDlgl |
| | 3AAAcrr | 1DDDcgc | 1AAAllr | | 1DDDllg |
| | 4AAAcrr | 2DDDcgc | 2AAAllr | | 2DDDllg |
| | 3AAAggg | 1DDDgcc | 1AAAlrl | | 1DDDrgr |
| | 4AAAggg | 2DDDgcc | 2AAAlrl | | 2DDDrgr |
| | 3AAAgll | 1DDDgll | 1AAArcr | | 1DDDrrg |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 4AAAgll | 2DDDgll | 2AAArcr | 2DDDrrg |
| 3AAAgrr | 1DDDgrr | 1AAArll | |
| 4AAAgrr | 2DDDgrr | 2AAArll | |
| 3AAAlcl | | 1AAArrc | |
| 4AAAlcl | | 2AAArrc | |
| 3AAAlgl | | 1AAArrr | |
| 4AAAlgl | | 2AAArrr | |
| 3AAAllc | | 1DDDcll | |
| 4AAAllc | | 2DDDcll | |
| 3AAAllg | | 1DDDcrr | |
| 4AAAllg | | 2DDDcrr | |
| 3AAAlll | | 1DDDlcl | |
| 4AAAlll | | 2DDDlcl | |
| 3AAAllr | | 1DDDllc | |
| 4AAAllr | | 2DDDllc | |
| 3AAAlrl | | 1DDDlll | |
| 4AAAlrl | | 2DDDlll | |
| 3AAArcr | | 1DDDllr | |
| 4AAArcr | | 2DDDllr | |
| 3AAArgr | | 1DDDlrl | |
| 4AAArgr | | 2DDDlrl | |
| 3AAArll | | 1DDDrcr | |
| 4AAArll | | 2DDDrcr | |
| 3AAArrc | | 1DDDrll | |
| 4AAArrc | | 2DDDrll | |
| 3AAArrg | | 1DDDrrc | |
| 4AAArrg | | 2DDDrrc | |
| 3AAArrr | | 1DDDrrr | |
| 4AAArrr | | 2DDDrrr | |
| 1DDDccc | | | |
| 2DDDccc | | | |
| 3DDDccc | | | |
| 4DDDccc | | | |
| 3DDDccg | | | |
| 4DDDccg | | | |
| 3DDDcgc | | | |
| 4DDDcgc | | | |
| 3DDDcll | | | |
| 4DDDcll | | | |
| 3DDDcrr | | | |
| 4DDDcrr | | | |
| 3DDDgcc | | | |
| 4DDDgcc | | | |
| 3DDDggg | | | |
| 4DDDggg | | | |
| 3DDDgll | | | |
| 4DDDgll | | | |
| 3DDDgrr | | | |
| 4DDDgrr | | | |

| |
|---|
| 3DDDlcl |
| 4DDDlcl |
| 3DDDlgl |
| 4DDDlgl |
| 3DDDllc |
| 4DDDllc |
| 3DDDllg |
| 4DDDllg |
| 3DDDlll |
| 4DDDlll |
| 3DDDllr |
| 4DDDllr |
| 3DDDlrl |
| 4DDDlrl |
| 3DDDrcr |
| 4DDDrcr |
| 3DDDrgr |
| 4DDDrgr |
| 3DDDrll |
| 4DDDrll |
| 3DDDrrc |
| 4DDDrrc |
| 3DDDrrg |
| 4DDDrrg |
| 3DDDrrr |
| 4DDDrrr |

Tableau 43 : Classement des 352 configurations

Si nous résumons ce classement, nous obtenons :

| classe | configurations |
|---|---|
| **1** | Produits 3+4 |
| | Produits 1+2 ccc |
| **2** | Produits 1+2 avec g en première position ou 2c |
| **3** | Produits 1+2 dégradation de lll ou rrr en r et c |
| **4** | Produits 1+2 ggg |
| **5** | Produits 1+2 AAA avec g et 2l ou g en dernier |
| | Produits 1+2 DDD avec g en deuxième ou troisième position avec l ou r |

Tableau 44 : Résumé du classement des 352 configurations

D'après ce tableau, nous tirons les conclusions suivantes :

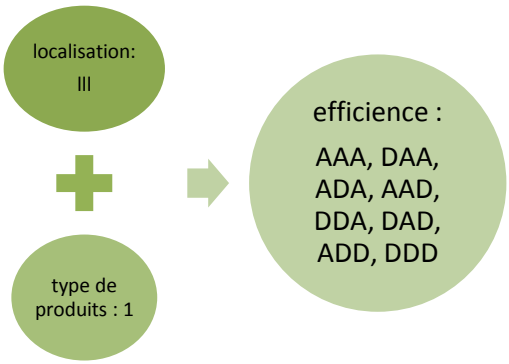
- le produit 4 est celui qui émet le plus d'équivalent CO2 suivi du produit 3. Les produits 1 et 2 sont proches.
- nous nous apercevons que les efficacités ont moins d'influence que les types de produits sur les émissions d'équivalent $CO_2$.

# Chapitre IV CONFIGURATIONS A EFFICACITE DEGRADEE

III. 1. Configurations AAA, un produit, localisation dégradée .....
III. 2. Configurations AAA, 4 produits, localisation dégradée .....
III. 3. Configurations à efficacité homogène, quatre produits, localisation dégradée.....

## IV. 1. **8 configurations lll, produit 1 à efficacité dégradée**

Les huit configurations sont dues à l'introduction dans une chaîne AAA d'un maillon dégradé D, puis de deux maillons dégradés DD, puis de trois DDD :




Les résultats de la classification par la méthode des centres mobiles sont donnés au tableau 45 et à la figure 67 selon :

- les émissions dues au stockage en tonnes équivalent $CO_2$
- les émissions dues au transport en tonnes équivalent $CO_2$.

en tonne équivalent $CO_2$

| CLASSIFICATION | émission dues au stockage | émissions dues au transport |
|---|---|---|
| DDA | 26.39 | 21.00 |
| AAA | 18.49 | 23.00 |
| ADD | 21.86 | 20.00 |
| DDD | 28.77 | 22.00 |
| AAD+DAD | 20.18 | 25.00 |
| ADA | 21.87 | 22.00 |
| DAA | 22.57 | 22.00 |
| **TOTAL** | 22.54 | 22.50 |

Tableau 45 : Classification des 8 configurations

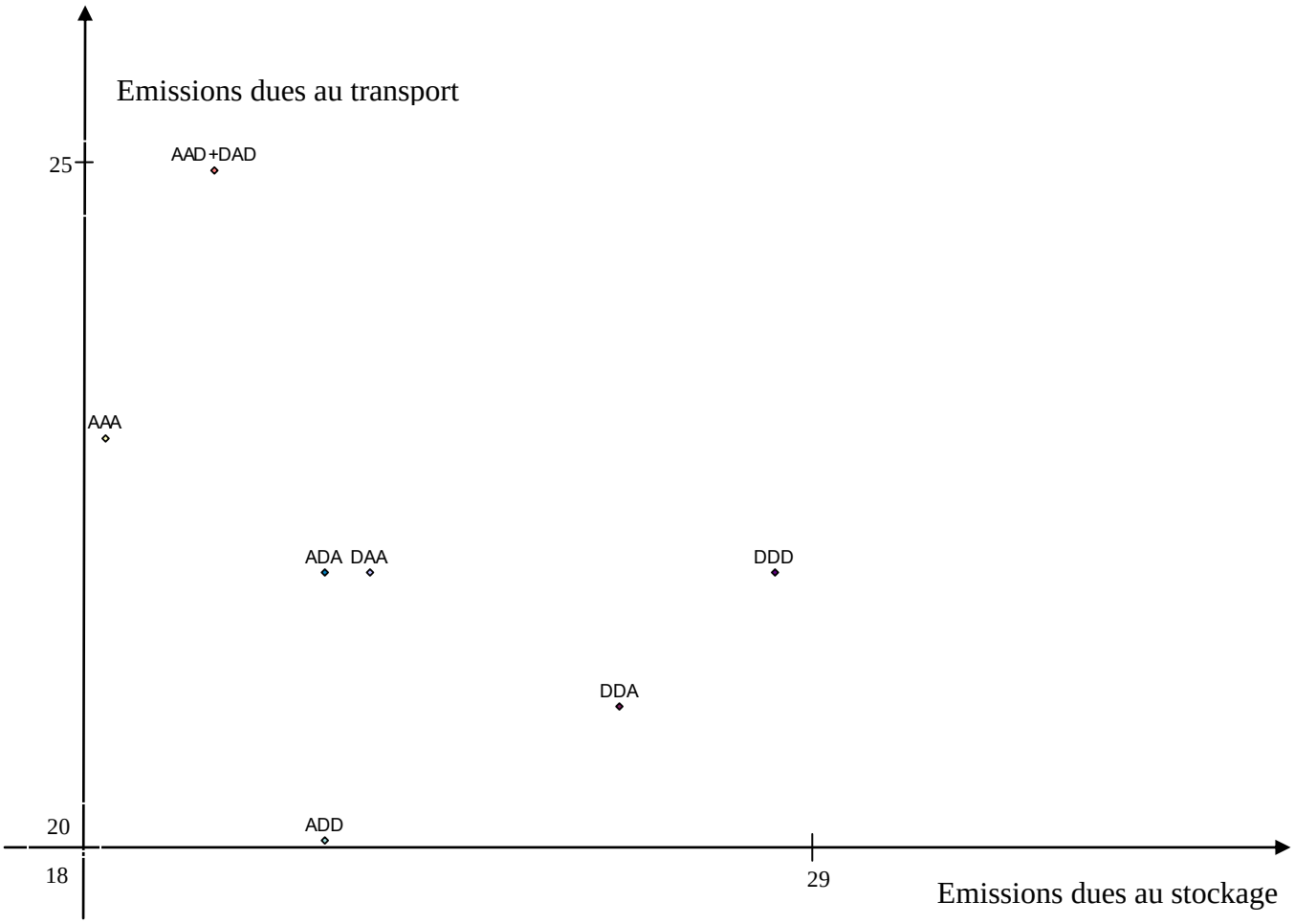



Figure 67 : Représentation graphique des 8 configurations

Sur la figure 67, la représentation des 8 configurations permet de conclure que, dès l'introduction d'un maillon dégradée, les émissions dues au stockage augmentent. Par contre, les conclusions sur les émissions dues au transport sont plus nuancées tout en ayant des écarts très faibles. Lorsque nous introduisons un maillon D dans la chaîne, cette introduction engendre une hausse des émissions dues au stockage. C'est un résultat logique puisque les stocks sont dimensionnés pour palier cette dégradation. Par contre, pour les émissions dues au transport, les écarts sont faibles et aucune conclusion n'est pertinente.

## IV. 2. **32 configurations lll, 4 produits, à efficacité dégradée**

Nous reprenons les huit configurations ci-dessus mais en les étendant aux quatre types de produits. Une analyse en composantes principales selon les trois critères suivants a été réalisée : émissions dues au transport, émissions dues au stockage, m² de stockage. Nous n'avons pas utilisé le critère des nombres de kilomètres. Il ne nous a pas semblé pertinent puisque nous sommes toujours en configuration lll. Nous avons gardé le niveau de stock car il reste un indicateur financier fort. Les résultats traités comme au chapitre précédent sont donnés aux tableaux et figure suivants :

| | Axe 1 (+61.87%) | | Axe 2 (+33.31%) | |
|---|---|---|---|---|
| CONTRIBUTIONS POSITIVES | émission dues au stockage | +49.0% | nombre de produits stockés | +99.0% |
| | émissions dues au transport | +49.0% | | |
| | | | | |
| CONTRIBUTIONS NEGATIVES | | | | |
| | | | | |
| | | | | |

Tableau 46 : Contributions aux axes des 32 configurations à efficacité dégradée

en tonne équivalent $CO_2$

| CLASSIFICATION | émission dues au stockage | émissions dues au transport | nombre de produits stockés |
|---|---|---|---|
| produits 1 et 2 ADA+DAA+ADD | 11.05 | 10.67 | 1712.67 |
| produit 4 | 2660.04 | 333.13 | 1797.38 |
| produit 3 | 1657.61 | 35.75 | 1797.38 |
| produits 1 et 2 DDD+DDA | 13.79 | 10.75 | 2137.50 |
| produits 1 et 2 AAD+DAD+AAA | 9.81 | 12.17 | 1520.33 |
| TOTAL | 1085.05 | 97.84 | 1772.06 |

Tableau 47 : Classification des 32 configurations

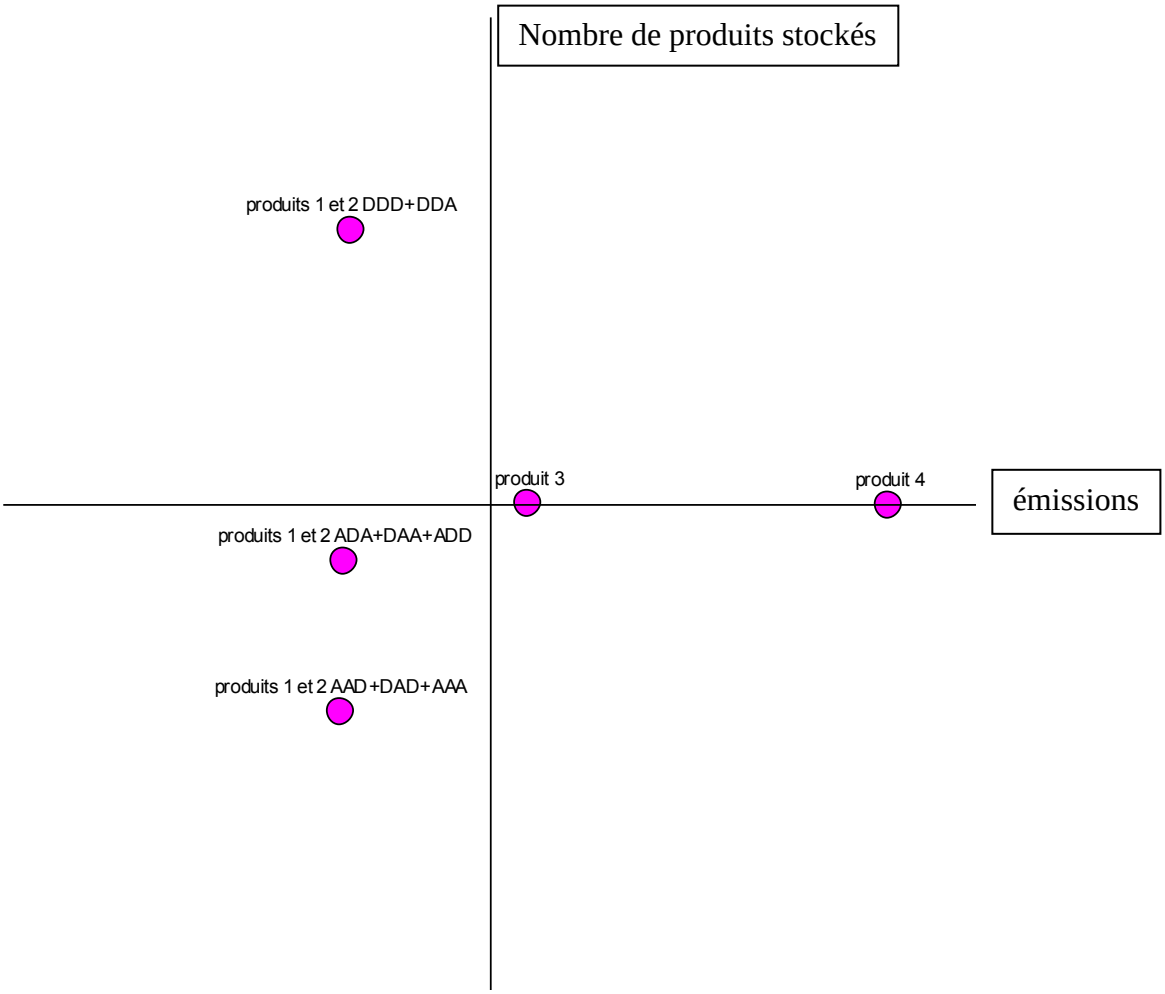



Figure 68 : Représentation des 32 configurations à efficacité dégradée

Nous notons comme au chapitre précédent l'importance du type de produit. Les deux premiers se classent dans la même catégorie. Sur la figure ci-dessus, nous remarquons

essentiellement le comportement des configurations DDD et DDA. Pour un même type de produits, elles émettent légèrement plus et surtout ont un niveau de stockage bien plus élevé.

## IV. 3. **128 configurations à localisations homogènes, 4 produits et à efficacité dégradée**

L'étude est encore étendue aux quatre localisations homogènes : lll, rrr, ccc et ggg. Nous menons la même analyse en composantes principales que décrite ci-dessus mais nous ajoutons le critère nombre de kilomètres. Les résultats sont réunis dans les deux tableaux et la figure ci-dessous.

| | Axe 1 (+38.99%) | | Axe 2 (+36.41%) | |
|---|---|---|---|---|
| CONTRIBUTIONS POSITIVES | émission dues au stockage | +49.0% | nombre de km | +47.0% |
| | émissions dues au transport | +43.0% | nbre de produits stockés | +43.0% |
| | | | | |
| CONTRIBUTIONS NEGATIVES | nbre de produits stockés | -4.0% | | |
| | nombre de km | -2.0% | | |
| | | | | |

Tableau 48 : Contributions aux axes de 128 configurations

| | en tonne équivalent $CO_2$ | | | |
|---|---|---|---|---|
| **CLASSIFICATION** | **émission dues au stockage** | **émissions dues au transport** | **nombre de km** | **nbre de produits stockés** |
| rrr produits 1 et 2 et produits 3 et 4 AAA-DDD | **492.42** | **245.10** | **5679990.00** | **1880.00** |
| ccc : produits 1+2+3+4 et lll-rr-ggg : produits 3 et 4 autres | **1890.17** | **18697.54** | **18402851.77** | **1894.44** |
| ggg :produits 1et 2 AAD-DAD | **11.99** | **5144.50** | **101606400.00** | **1859.00** |
| lll : produits 1+2 et produits 3+4 AAA-DDD | **461.68** | **45.75** | **564398.00** | **1763.70** |
| ggg : produits 1 et 2 DDA-ADD | **17.01** | **3646.00** | **84770400.00** | **2635.50** |
| ggg : produits 1+2 AAA-DDD-DAA-ADA et produits 3+4 AAA-DDD | **1006.65** | **21770.83** | **91638400.00** | **2381.50** |
| **TOTAL** | **1248.51** | **12294.23** | **25167575.63** | **1939.47** |

Tableau 49 : Classification des 128 configurations

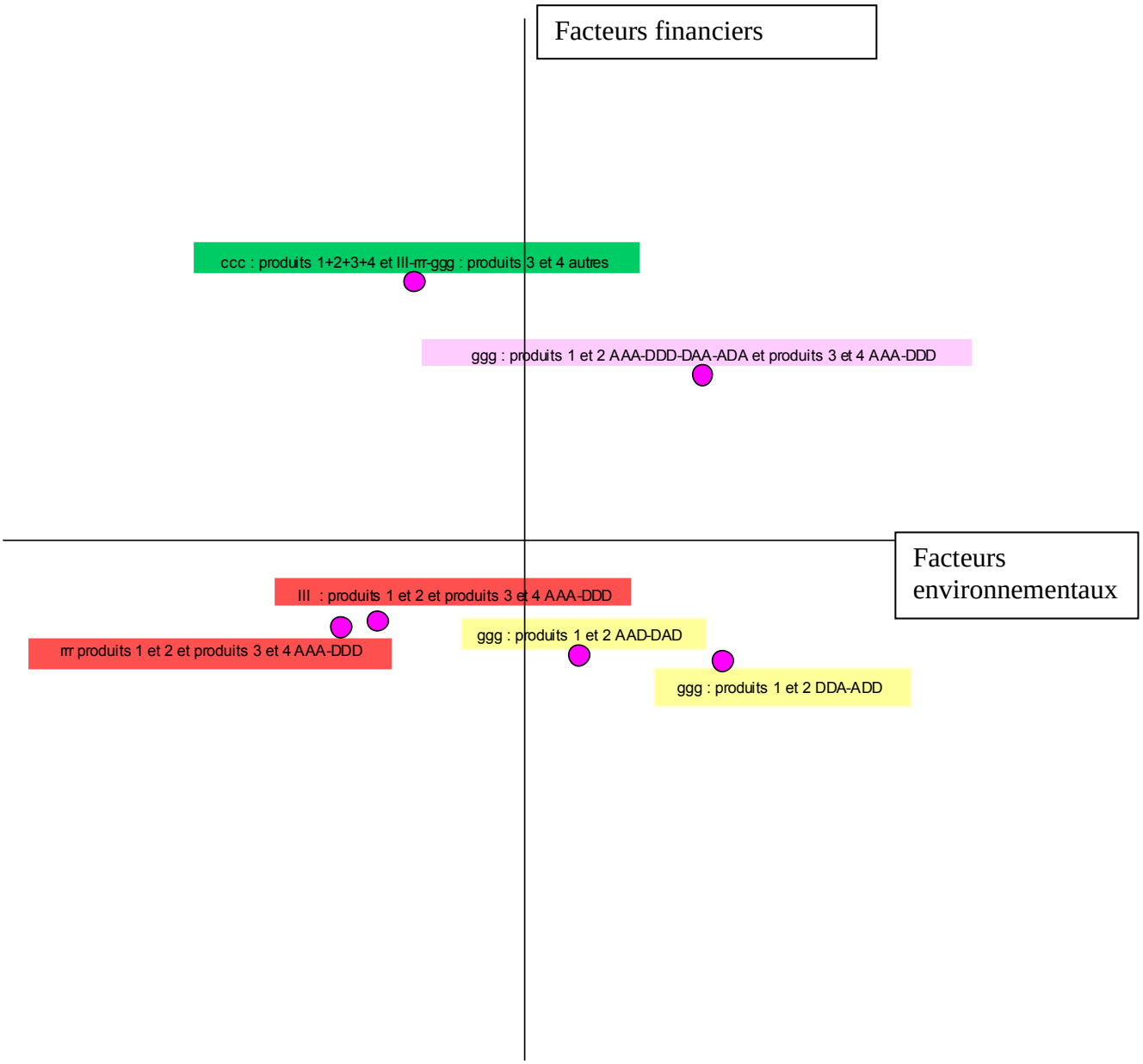



Figure 69 : Représentation des 128 configurations

Nous voyons que les localisations lll et rrr forment deux classes bien distinctes : les émissions dues au transport sont multipliées par 5 pour une configuration 3r (en rouge au tableau 49).

L'hétérogénéité de l'efficacité dégrade la performance générale de la chaîne logistique notamment pour les configurations de produits 3 et 4. Les configurations de type lll-rrr pour les produits 3 et 4 sont dans la même classe que les produits 1 et 2 si leurs efficacités sont homogènes. Par contre, si leurs efficacités sont hétérogènes, elles sont classées avec les configurations 3c (en vert au tableau 49). Le nombre de kilomètres est alors multiplié par 40 par rapport aux configurations 3l et par 4 par rapport aux configurations 3r. Les stocks sont légèrement plus élevés.

Les configurations ccc et ggg forment d'autres classes.. Trois classes sont définies pour les configurations ggg. Les produits 1 et 2 se classent ensemble (en jaune) pour des configurations hétérogènes. Les produits 3 et 4 en configurations homogènes se classent avec les produits 1 et 2 en configurations soit homogènes soit 2A (en rose).

### IV.3.1Analyse de la variance sur l'efficience

Si nous menons une analyse de la variance sur l'efficience avec comme paramètres : émissions dues au stockage, émissions dues au transport, nombre de kilomètres, nombre de produits stockés**,** nous approfondissons les conclusions précédentes. Le tableau 50 montre que plus la dégradation est en amont plus les émissions dues au stockage et le nombre de produits stockés sont importants a contrario pour les résultats des transports et inversement plus la dégradation est en aval.

| efficience | émissions dues au stockage | émissions dues au transport | nombre de km | nombre de produits stockés |
|---|---|---|---|---|
| **AAA** | 1036.12 | 12038.01 | 29117931.09 | 1668.00 |
| **AAD** | 1055.89 | 16422.56 | 25268490.86 | 1742.87 |
| **DAA** | 1326.00 | 9229.96 | 23493533.83 | 1960.34 |
| **ADA** | 1167.63 | 10842.50 | 23445079.84 | 1832.82 |
| **DDD** | 1601.41 | 12311.75 | 29459041.41 | 2578.22 |
| **ADD** | 1169.57 | 11791.36 | 22306373.59 | 1834.90 |
| **DAD** | 1055.89 | 16422.56 | 25268490.86 | 1742.87 |
| **DDA** | 1581.18 | 9255.65 | 22932566.64 | 2165.81 |
| **TOTAL** | 1258.01 | 12297.52 | 25926147.66 | 1967.81 |

Tableau 50 : Résultats de l'analyse de la variance sur l'efficience avec 2560 configurations

Plus le maillon dégradé est en amont de la chaîne, plus les émissions dues au stockage augmentent. A contrario, plus le maillon est en aval, plus les émissions dues au transport augmentent. Un résultat est plus surprenant. La configuration DDD est la plus émettrice au niveau de stocks mais n'est pas la plus émettrice au niveau du transport. La configuration DDA est très proche de la configuration DDD. Par contre, les deux autres configurations hétérogènes avec deux D sont nettement plus émettrices en termes de transport.

Nous pouvons donc en conclure que plus la chaîne logistique a des maillons à efficacité faible, plus elle a intérêt à être d'efficacités homogènes. Ses résultats environnementaux seront alors meilleurs a contrario de ses résultats financiers en termes notamment de stocks. Ceci peut s'expliquer de la manière suivante : une chaîne logistique à efficacités hétérogènes entraîne plus de transports express car les maillons sont tellement dissemblables qu'ils ne sont pas adaptés les uns aux autres. En effet, les tailles de lots sont différentes selon l'efficacité des entreprises. Par exemple, une entreprise d'efficacité A commande des lots de petite taille à une entreprise d'efficacité D qui travaille sur des tailles de lots plus importantes. Cette dernière va donc regrouper des commandes et pénaliser son client.

# Chapitre V AUTRES CONFIGURATIONS

V. 1. 64 configurations AAA, produit 1, à localisation quelconque .....
V. 2. 128 configurations à efficacité homogène, produit 1 et à localisation quelconque.....
V. 3. 512 configurations à efficacité homogène, 4 produits et à localisation quelconque ...
V. 4. Bilan des conclusions .....

## V. 1. **64 configurations AAA, produit 1, à localisation quelconque**

Pour analyser ces 64 configurations, nous utilisons la classification hiérarchique plus explicite ici. Nous obtenons six classes. Le tableau suivant présente les caractéristiques de chacune des classes selon les quatre critères : émissions dues au transport et au stockage, nombre de kilomètres, nombre de produits stockés.

| | en tonne équivalent $CO_2$ | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Classe** | Emissions dues stockage | dues transport | Nombre de km | Nombre produits stockés |
| **1** | 20.988 | 2544.187 | 33356650.000 | 1626.941 |
| **2** | 23.335 | 4942.753 | 40656069.000 | 1808.900 |
| **3** | 23.211 | 5195.961 | 64029740.000 | 1799.267 |
| **4** | 19.998 | 877.988 | 6169685.000 | 1550.200 |
| **5** | 21.978 | 2941.052 | 14021270.000 | 1703.714 |
| **6** | 24.572 | 7379.406 | 92113600.000 | 1904.800 |

Tableau 51 : Barycentres des six classes composées de 64 configurations à localisation quelconque

D'après le dendrogramme ci-dessous, les classes sont proches deux-deux et quatre classes appartiennent au même nœud.

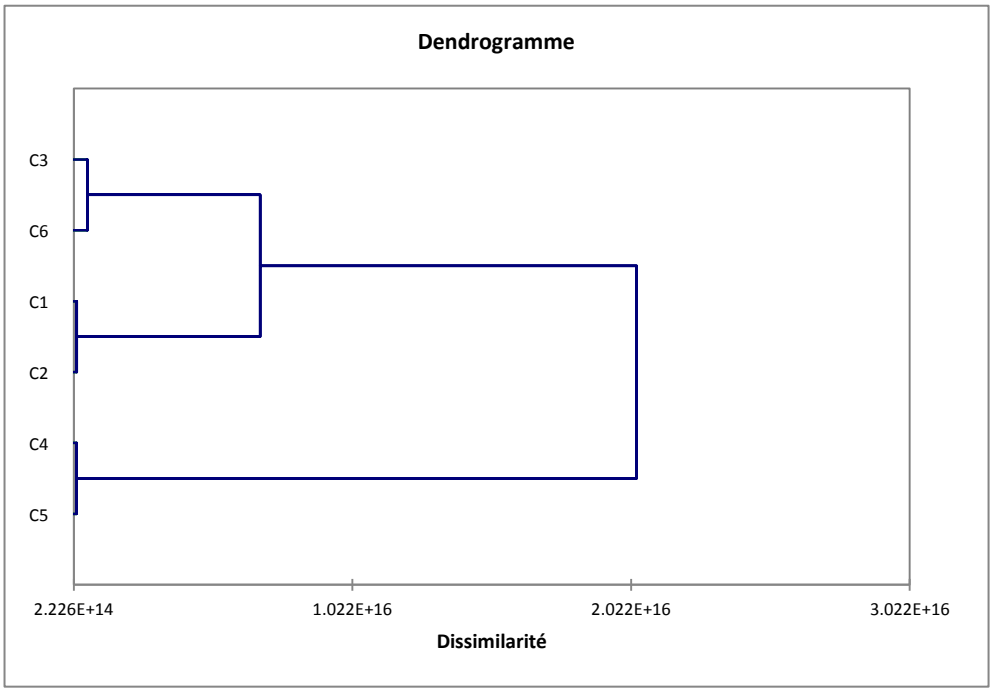



Figure 70 : dendrogramme des 64 configurations à localisation quelconque

Les six classes ont la composition suivante :

| Classe | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | grl | grl | grg | rcl | rcc | ggg |
| | grr | rgc | rgg | rcr | crc | |
| | rcg | gcr | gcg | llr | lcc | |
| | rgl | gcl | ggr | lll | clc | |
| | grg | gcc | ggl | llc | ccr | |
| | gll | cgr | ggc | rlc | ccl | |
| | rlg | cgl | cgg | rlr | ccc | |
| | lrg | cgc | glg | rll | | |
| | crg | glc | lgg | lrc | | |
| | lcg | ccg | | lrr | | |
| | rrg | | | lrl | | |
| | glr | | | crl | | |
| | llg | | | crr | | |
| | clg | | | lcr | | |
| | lgr | | | lcl | | |
| | lgc | | | rrr | | |
| | lgl | | | rrl | | |
| | | | | rrc | | |
| | | | | clr | | |
| | | | | cll | | |

Tableau 52 : Composition des six classes

La configuration 3g (C6) a toujours une situation particulière due à l'ensemble des critères dont la valeur est plus élevée. Elle appartient au même nœud que les configurations 2g (C3). D'un autre côté, nous trouvons les configurations 1g ou 2c (C1 et C2). Celles-ci forment deux classes. L'une comporte les dégradations de c en g ou g placé en première ou deuxième position. L'autre possède principalement les configurations avec un g final ou avec uniquement des r et l. Si nous remontons au nœud de départ, un autre groupe de configuration se sépare en deux (C4 et C5). Le premier groupe comporte des configurations en 2c ou 3c et le deuxième des configurations avec 1 c et/ou uniquement des l et r.

Nous pouvons donc conclure que l'introduction d'une localisation g où qu'elle soit située influence fortement les résultats. Cela est encore plus vrai avec deux localisations et devient critique avec trois. A contrario, l'introduction d'une configuration c est moins significative puisque les configurations avec un c appartiennent à la même classe que les configurations lll et rrr. L'introduction de deux configurations c quant à elle commence à dégrader les résultats.

## V. 2. **128 configurations à efficacité homogène, produit 1 et à localisation quelconque**

La classification hiérarchique a permis d'identifier trois classes :

| | en tonne équivalent $CO_2$ | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Classe** | Stockage | Transport | Nombre de km | Nombre produits stockés |
| **1** | 27.788 | 3372.808 | 36237329.259 | 2154.137 |
| **2** | 29.756 | 5354.556 | 67160146.500 | 2306.680 |
| **3** | 26.122 | 1427.468 | 8313102.407 | 2024.974 |

Tableau 53 : Barycentres des trois classes

Le dendrogramme représente les trois classes :

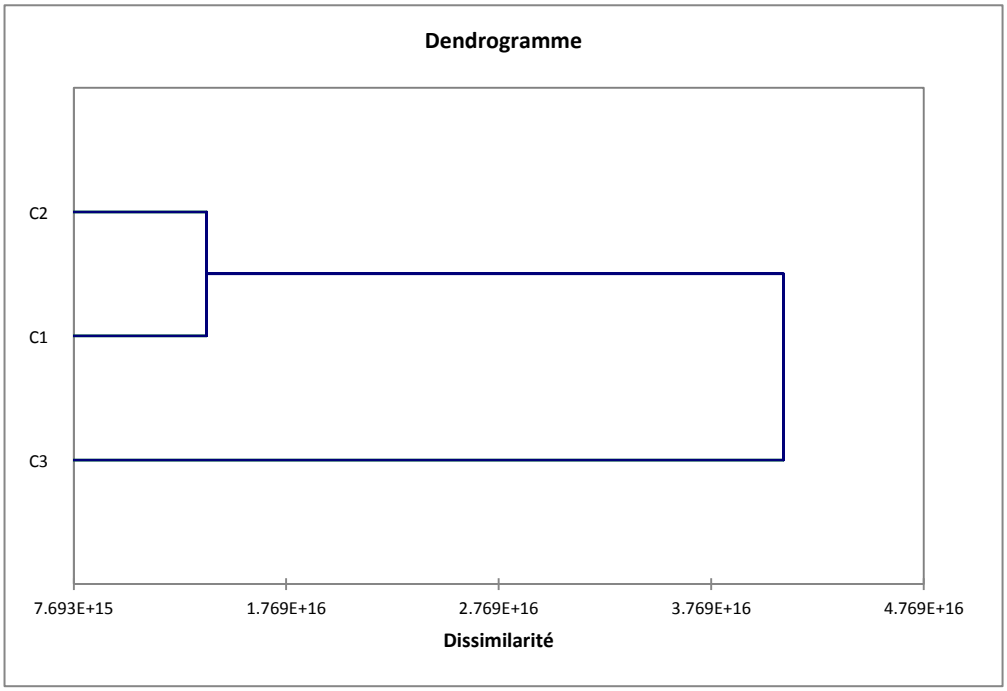



Figure 71 : dendrogramme des 128 configurations

Les 128 configurations sont réparties de la manière suivante :

| Classe | 1 | 2 | 3 |
|---|---|---|---|
| | 1AAAgrl | 1AAAgrg | 1AAArcl |
| | 1AAAgrl | 1AAArgg | 1AAArcr |
| | 1AAAgrr | 1AAAgcg | 1AAArcc |
| | 1AAArcg | 1AAAggr | 1AAAllr |
| | 1AAArgl | 1AAAggl | 1AAAlll |
| | 1AAArgc | 1AAAggc | 1AAAllc |
| | 1AAAgrg | 1AAAggg | 1AAArlc |
| | 1AAAgll | 1AAAcgg | 1AAArlr |

| | | |
|---|---|---|
| 1AAAgcr | 1AAAglg | 1AAArll |
| 1AAAgcl | 1AAAlgg | 1AAAlrc |
| 1AAAgcc | 1DDDgrg | 1AAAlrr |
| 1AAArlg | 1DDDggc | 1AAAlrl |
| 1AAAlrg | 1DDDcgg | 1AAAcrl |
| 1AAAcrg | 1DDDgcg | 1AAAcrc |
| 1AAAcgr | 1DDDlgg | 1AAAcrr |
| 1AAAcgl | 1DDDggl | 1AAAlcr |
| 1AAAcgc | 1DDDggr | 1AAAlcc |
| 1AAAlcg | 1DDDglg | 1AAAlcl |
| 1AAArrg | 1DDDggg | 1AAArrr |
| 1AAAglr | 1DDDrgg | 1AAArrl |
| 1AAAglc | | 1AAArrc |
| 1AAAllg | | 1AAAclr |
| 1AAAclg | | 1AAAclc |
| 1AAAccg | | 1AAAcll |
| 1AAAlgr | | 1AAAccr |
| 1AAAlgc | | 1AAAccl |
| 1AAAlgl | | 1AAAccc |
| 1DDDrrg | | 1DDDccc |
| 1DDDgcl | | 1DDDlcl |
| 1DDDgcr | | 1DDDlcr |
| 1DDDgrr | | 1DDDrcc |
| 1DDDgrl | | 1DDDrrc |
| 1DDDlcg | | 1DDDcrc |
| 1DDDllg | | 1DDDlcc |
| 1DDDrcg | | 1DDDlrc |
| 1DDDccg | | 1DDDcrr |
| 1DDDgll | | 1DDDcrl |
| 1DDDglr | | 1DDDrll |
| 1DDDcgl | | 1DDDrlr |
| 1DDDcgr | | 1DDDllc |
| 1DDDlrg | | 1DDDrlc |
| 1DDDcgc | | 1DDDrcr |
| 1DDDlgc | | 1DDDrcl |
| 1DDDgcc | | 1DDDlrl |
| 1DDDglc | | 1DDDlrr |
| 1DDDclg | | 1DDDrrl |
| 1DDDrgr | | 1DDDrrr |
| 1DDDrgl | | 1DDDlll |
| 1DDDrlg | | 1DDDllr |
| 1DDDlgl | | 1DDDcll |
| 1DDDlgr | | 1DDDclr |
| 1DDDrgc | | 1DDDccl |
| 1DDDcrg | | 1DDDccr |
| 1DDDgrc | | 1DDDclc |

Tableau 54 : Classement des 128 configurations à localisation quelconque

Si nous résumons ce classement, nous obtenons :

| Classe | Configurations |
|---|---|
| **1** | Avec 1 localisation g |
| **2** | Avec deux ou trois localisations g |
| **3** | Sans localisation g |

Tableau 55 : Résumé du classement des 128 configurations

Nous confirmons donc que l'efficacité a moins d'impact que la localisation. Parmi les localisations, la localisation g est prépondérante.

## V. 3. **512 configurations à efficacité homogène, 4 produits et à localisation quelconque**

La classification hiérarchique donne trois classes aux composantes suivantes :

| Classe | émissions dues au stockage | émissions dues au transport | nombre de kilomètres | nombre de produits stockés |
|---|---|---|---|---|
| **1** | 1432,536 | 22547,469 | 67160146,500 | 2306,680 |
| **2** | 1337,801 | 14392,622 | 36237329,259 | 2154,137 |
| **3** | 1257,586 | 6116,353 | 8313102,407 | 2024,974 |

Tableau 56 : Barycentres des 3 classes représentant les 512 configurations quelconques

Le dendrogramme est en figure 72 :

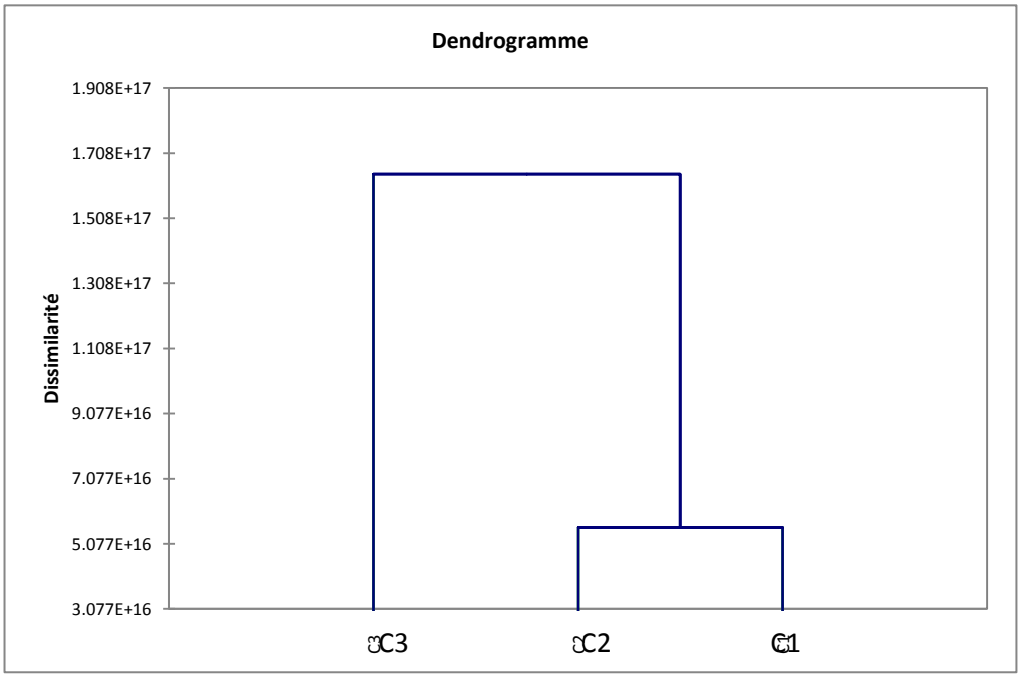



Figure 72 : dendrogramme des 512 configurations quelconques

En résumant les configurations de chacune des trois classes[13], nous obtenons les mêmes résultats que l'analyse précédente à savoir quelle que soit l'efficacité, quel que soit le type de produit, la classe 1 ne comprend aucune localisation g, la classe 2 une et la classe 3 deux ou trois.

# V. 4. Bilan des conclusions

**configurations homogènes**

- le type de produit est très influent
- les configurations lll émettent moins que les configurations rrr
- les configurations des produits 4 lll émettent autant que les autres produits rrr
- les résultats des configurations AAA sont très proches de ceux des configurations BBB
- les résultats des configurations DDD sont très proches de ceux des configurations CCC

**configurations à localisation dégradée**

- si la localisation dégradée est en première ou deuxième position, les résultats sont plus importants que si elle se situe en troisième position
- les configurations des produits 1 et 2 ccc sont similaires aux configurations des produits 3 et 4
- l'efficacité a moins d'influence que le type de produits

**configurations à efficacité dégradée**

- dès le premier maillon dégradé, les émissions dues au stockage augmentent
- les configurations DDD et DDA sont similaires
- les configurations homogènes émettent moins que les configurations hétérogènes

**configurations à localisation quelconque**

- de manière croissante, l'introduction d'un maillon g puis de 2 puis de 3 entraîne un fort changement des résultats
- il faut au moins introduire 2c pour noter un changement de résultats notable

[13] Détails des classe en annexe II.1.

# Chapitre VI CONFIRMATION DE LA PREDOMINANCE DE CERTAINS PARAMETRES

VI. 1. Efficacité, localisation, type de produits .....
VI. 2. Détails de la localisation globale .....

Une analyse de la variance ou ANOVA (ANalysis Of VAriance) permet de vérifier certaines conclusions du V.4 notamment sur la prédominance de certains paramètres.

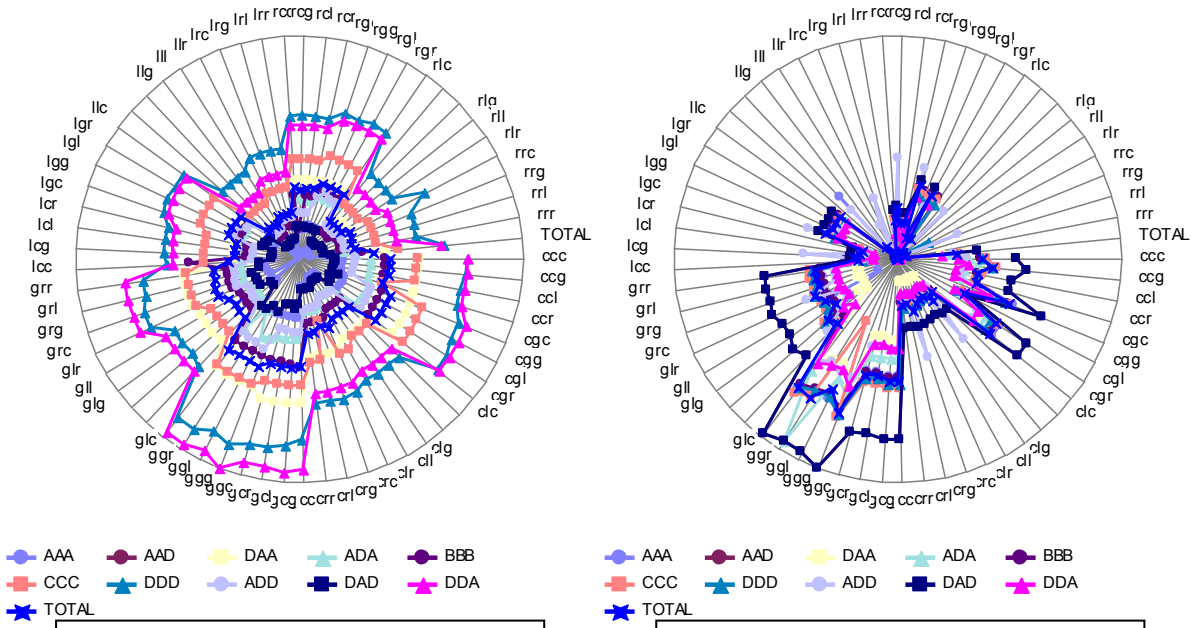
## VI. 1. **Efficacité, localisation, type de produits**

Nous testons en premier lieu les trois données d'entrée. L'analyse de la variance donne les résultats suivants :

| Effet principal/selon | les émissions dues au stockage | les émissions dues au transport | le nombre de produits stockés | le nombre de kilomètres |
|---|---|---|---|---|
| Localisation | Très significatif | Très significatif | Très significatif | Très significatif |
| Efficacité | Non significatif | Non significatif | Très significatif | Très significatif |
| Type de produits | Très significatif | Très significatif | Très significatif | Très significatif |

Tableau 57 : Résultats de l'analyse de la variance sur efficacité/localisation/type de produits[14]

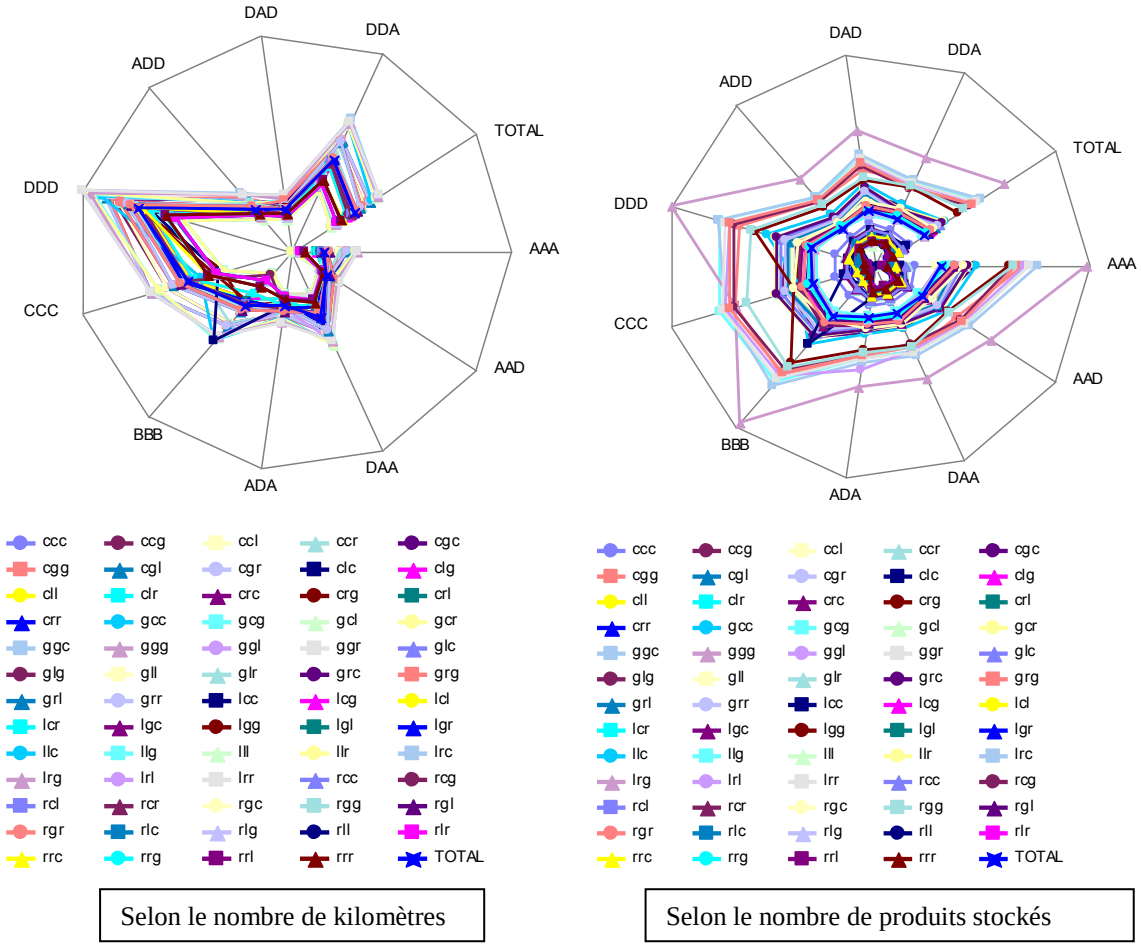
Le choix de la localisation et du type de produit est donc toujours très influent alors que celui de l'efficacité ne l'est que pour les critères financiers.




Selon les émissions dues au stockage

Selon les émissions dues au transport

[14] détails en annexe II.2.




Selon le nombre de kilomètres

Selon le nombre de produits stockés

Figure 73 : Résultats pour l'efficacité et la localisation

Deux configurations ressortent :

- pour le nombre de kilomètres : DDD (avec CCC) et DDA
- pour les émissions : DDD et DDA avec les localisations gcX et ggX

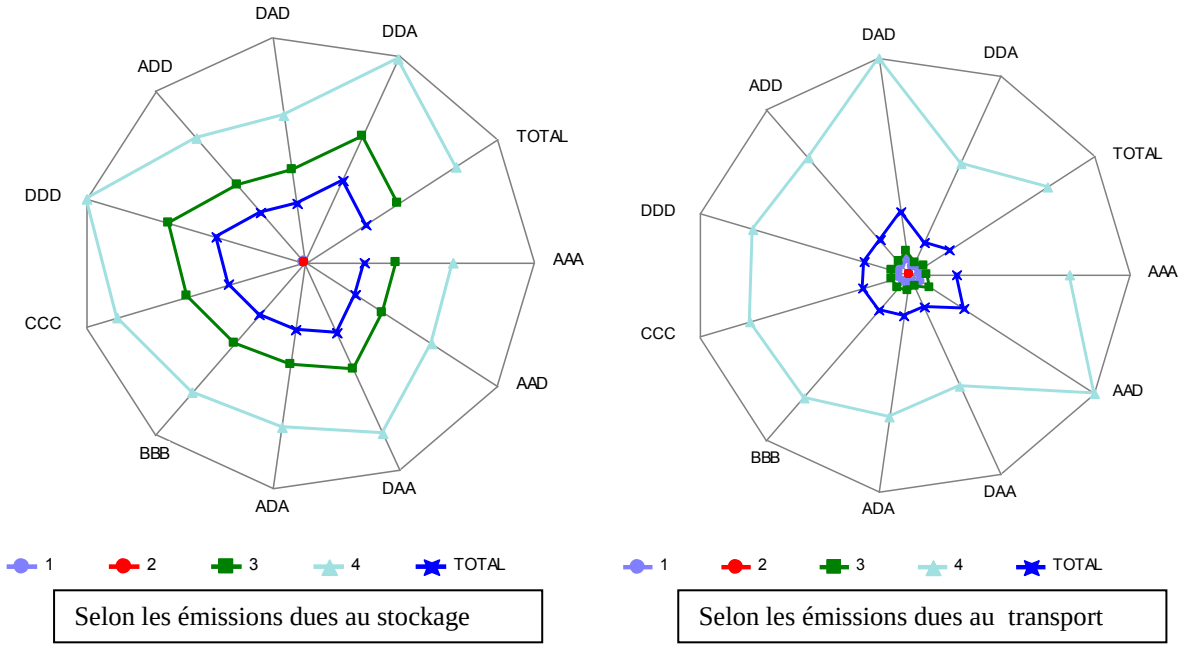



Figure 74 : Résultats pour l'efficacité et le type de produits

Logiquement, les produits émettent de moins en moins dans l'ordre 4 puis 3 puis 1 puis 2 (figure 74).

Les conclusions du chapitre précédent nous amènent à approfondir la donnée locative. Quel est le degré d'impact de la localisation sur les performances environnementales et financières ?

## VI. 2. **Détails de la localisation globale**

Nous utilisons de nouveau l'analyse de la variance dont les résultats sont donnés au tableau 58 et à la figure 75.

| Effet principal/selon | les émissions dues au stockage | les émissions dues au transport | le nombre de produits stockés | le nombre de kilomètres |
|---|---|---|---|---|
| Localisation 1 | Très significatif | Très significatif | Très significatif | Très significatif |
| Localisation 2 | Très significatif | Très significatif | Très significatif | Très significatif |
| Localisation 3 | Non significatif | Non significatif | Très significatif | Non significatif |

Tableau 58 : Résultats de l'analyse de la variance sur localisation 1/3/5[15]

Ces résultats indiquent que le choix de la première localisation et de la deuxième localisation est fondamental. Par contre, le choix de la dernière localisation est de moindre importance sauf pour le nombre de produits stockés.

[15] Détails des résultats en annexe II.5.

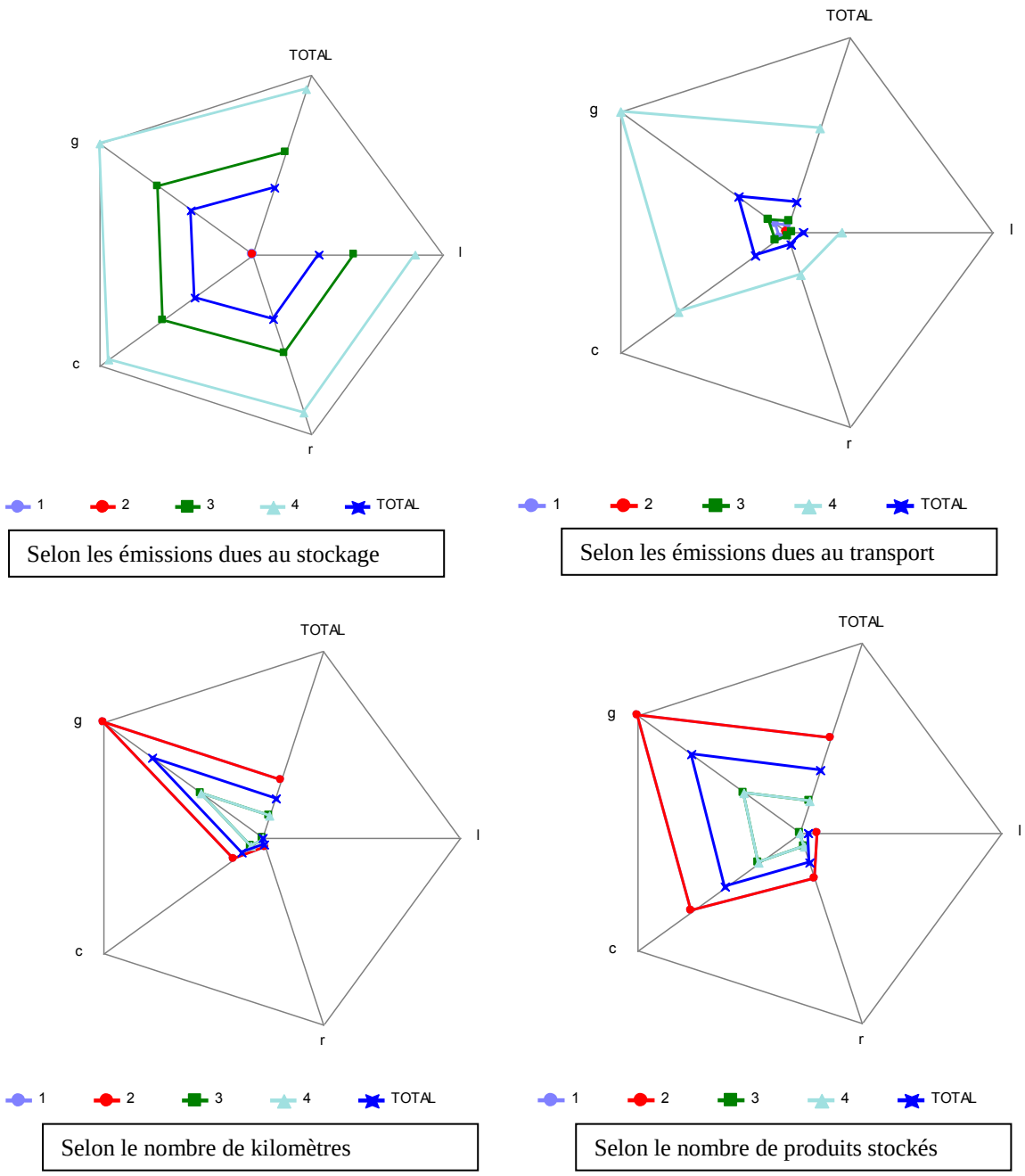



Figure 75: Résultats pour le type de produits et la localisation 1

D'après la figure 75, plus la localisation est lointaine plus les résultats sont importants quel qu soit le type de produits.

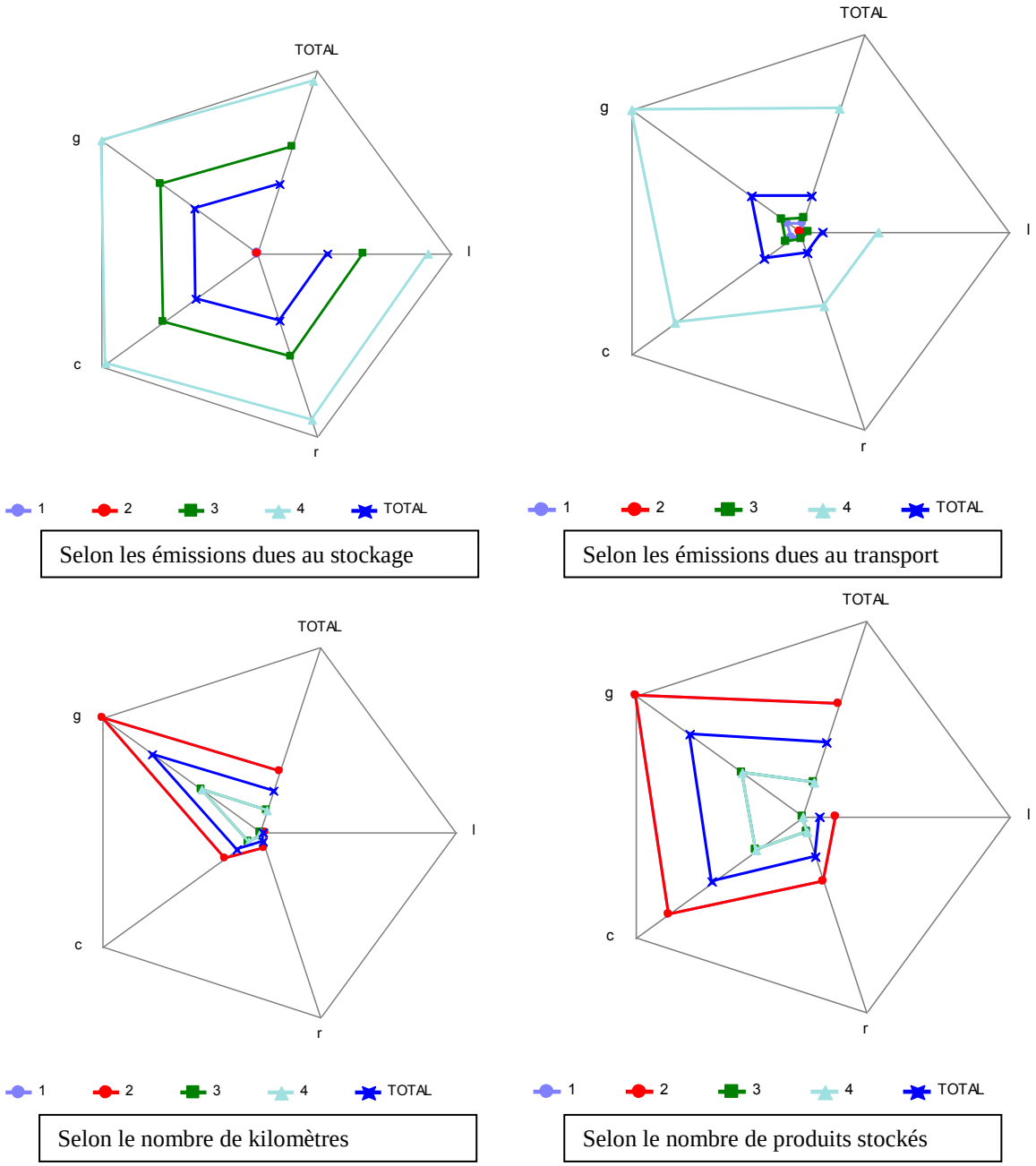



Figure 76: Résultats de la deuxième localisation et du type de produits

Nous obtenons les mêmes résultats que pour la localisation 1 à savoir l'importance de la deuxième localisation.

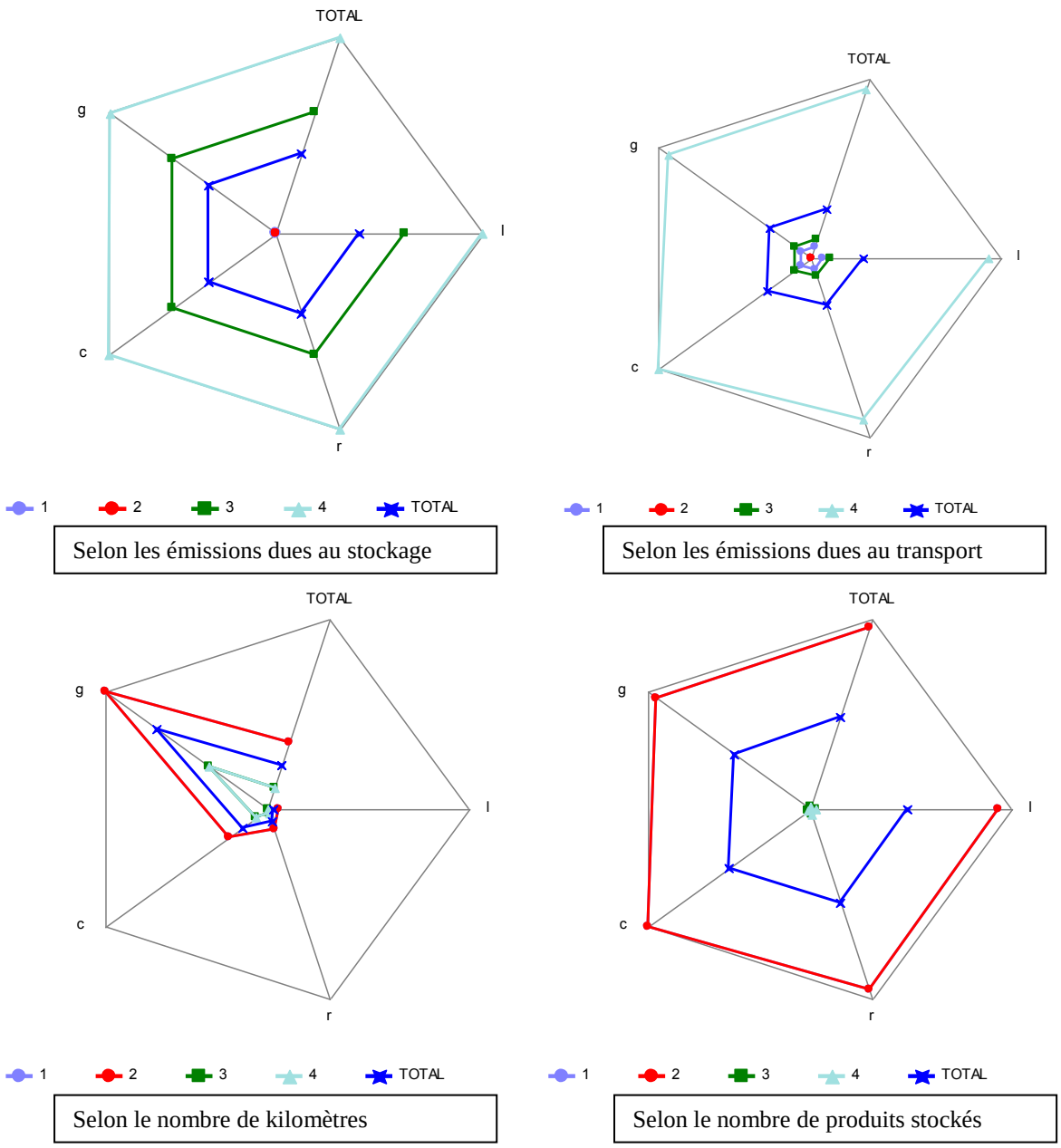



Figure 77 : Résultats pour le type de produits et la dernière localisation

La dernière localisation n'est par contre que peu influente sauf pour le nombre de produits stockés. Ceci confirme bien nos conclusions précédentes.

# Synthèse

**configurations homogènes**

- le type de produit est très influent
- les configurations lll émettent moins que les configurations rrr
- les configurations des produits 4 lll émettent autant que les autres produits rrr
- les résultats des configurations AAA sont très proches de ceux des configurations BBB
- les résultats des configurations DDD sont très proches de ceux des configurations CCC

**configurations à localisation dégradée**

- si la localisation dégradée est en première ou deuxième position, les résultats sont plus significatifs que si elle se situe en troisième position
- les configurations des produits 1 et 2 ccc sont similaires aux configurations des produits 3 et 4
- l'efficacité a moins d'influence que le type de produits

**configurations à efficacité dégradée**

- dès le premier maillon dégradé, les émissions dues au stockage augmentent
- les configurations DDD et DDA sont similaires
- les configurations homogènes émettent moins que les configurations hétérogènes

**configurations à localisation quelconque**

- de manière croissante, l'introduction d'un maillon g puis de 2 puis de 3 entraîne un fort changement des résultats
- il faut au moins introduire 2c pour noter un changement conséquent

**Confirmations**

- **La localisation et le type de produits sont toujours influents mais l'efficacité ne l'est que pour les critères financiers**
- **La localisation 1 puis la localisation 2 sont très impactantes alors que la localisation 3 ne l'est pas sauf pour la quantité de produits stockés.**

# Chapitre VII CONCLUSION ET PERSPECTIVES

VII. 1. Apports .....
VII. 2. Conclusions.....
VII.2.1 Poids des différentes données d'entrée .....
VII.2.2 Type de produits .....
VII.2.3 Localisation.....
VII.2.4 Efficacité.....
VII. 3. Perspectives .....
VII.3.1 A court terme .....
VII.3.2 A long terme .....

## VII. 1. **Apports**

Dans un contexte de forte compétitivité, toute décision stratégique d'une entreprise doit être prise en connaissant l'ensemble de ses implications et conséquences. Or, pour appuyer ses décisions, l'entreprise a besoin d'outils conceptuels ou de guide d'aide à la décision. Le développement durable est aujourd'hui un élément que les entreprises ne peuvent plus ignorer au moment de définir leurs choix stratégiques. L'entreprise doit statuer entre performance financière et performance environnementale. Cette thèse répond à ce double besoin en fournissant un guide d'aide à la décision dans un contexte de développement durable.

Notre problématique porte sur les performances des chaînes logistiques vertes. Nos objectifs sont notamment de proposer un guide d'aide à la décision. Grâce à une revue de littérature, nous avons créé un modèle conceptuel de chaîne logistique verte. Nous avons ensuite conçu un modèle informatique. Les données d'entrée de ce modèle sont le type de produits fabriqués, la localisation des sites de production et l'efficacité des entreprises. Enfin, nous avons simulé différents scénarii selon le principe de la simulation à événement discrets. Grâce à des analyses statistiques, nous avons comparé les performances financières (niveau de stock, nombre de kilomètres parcourus) et les performances environnementales (émissions d'équivalent $CO_2$) des 2560 configurations possibles.

Les apports principaux de notre travail sont :

- la création d'un modèle général de chaîne logistique verte,
- la conception d'un outil de configuration et de simulation de chaînes logistiques composées d'entreprises de différents profils en termes de localisation de sites de production, de type de produits fabriqués et d'efficacité de production,

- la réalisation de simulations de chaînes logistiques ayant différentes localisations, efficacités et produisant différents produits,
- la classification de configurations logistiques à partir d'analyses statistiques,
- des conclusions pouvant constituer un guide d'aide à la décision.

## VII. 2. **Conclusions**

Nous reposons l'hypothèse de départ de notre thèse qui est un stock dimensionné pour un taux de service au client final de 100%. En effet, le service client est un critère nécessaire à la pérennité d'une activité industrielle. Parmi nos conclusions, nous retenons les suivantes. Nous nous intéressons d'abord aux trois données d'entrée en les comparant puis nous nous focalisons sur chacune d'entre elles.

### VII.2.1Poids des différentes données d'entrée

La localisation et le type de produits sont très impactants alors que l'efficacité ne l'est que pour les critères financiers. En effet, nos hypothèses de départ consistent à d'augmenter les stocks pour palier à une efficacité moindre. Une efficacité moindre engendre donc des niveaux de stock plus élevés mais les émissions dues au stockage sont négligeables par rapport à celles émises lors du transport.

Cette conclusion nous amène à préconiser aux ingénieurs des départements de recherche et développement de porter une attention particulière au design du produit. Quant à la fonction achat, elle doit se concentrer sur la localisation des fournisseurs. Mais voyons ces deux éléments de manière plus précise.

### VII.2.2Type de produits

Plus les produits sont lourds et encombrants, plus les critères environnementaux se détériorent. Plus le produit est encombrant, plus le nombre de transport sera élevé. De plus, son poids peut également donner lieu à un nombre limite de produit par transport.

Les kilomètres et le niveau de stock restent stables d'un point de vue numérique quelque soit le type de produits. Mais plus un produit est lourd et encombrant plus un kilomètre de transport coûte cher. Un produit lourd et encombrant nécessitera également plus de m² de stockage et donc son stockage sera plus coûteux.

Que ce soit en termes financiers ou que ce soit en termes environnementaux, les ingénieurs devront se focaliser sur un design léger et compact afin de limiter les émissions d'équivalent $CO_2$ mais également de diminuer le coût du transport et du stockage.

### VII.2.3Localisation

Les conclusions concernant la localisation comportent deux volets :

- le type de localisation

Plus les localisations sont lointaines, plus la chaîne logistique émet d'équivalent $CO_2$. L'introduction d'un seuil maillon à localisation globale impacte très fortement la performance de la chaîne logistique alors qu'il faut introduire deux localisations continentales pour observer une influence significative.

- place de la localisation

La localisation du premier maillon puis du deuxième maillon sont très influentes contrairement à celle du troisième maillon.

Pour la fonction achat, le choix des fournisseurs est donc essentiel. Dans cette recherche, il faut non seulement se focaliser sur le fournisseur de rang 1 mais également sur le fournisseur de rang 2. Ceux-ci devront être le plus près possible géographiquement l'un de l'autre. La proximité de ses fournisseurs est plus importante que celle de ses clients.

### VII.2.4Efficacité

L'efficacité de la chaîne logistique peut être soit homogène, soit hétérogène, soit dégradée. Selon les cas, nous obtenons différentes conclusions :

- homogénéité de l'efficacité

Les configurations à efficacités homogènes sont moins émettrices d'équivalent $CO_2$ que les configurations à efficacités hétérogènes. Plus l'efficacité est faible plus il est intéressant d'avoir une chaîne logistique homogène. Par exemple, une chaîne logistique d'efficacité ADD sera plus émettrice qu'une chaîne logistique d'efficacité DDD.

- dégradation de l'efficacité

La dégradation de l'efficacité engendre une augmentation du niveau de stock.

Ainsi, dans le choix des fournisseurs, les acheteurs doivent porter attention à leur efficacité car plus elle est dégradée, plus les niveaux de stocks seront élevés. Dans un même temps, il faut privilégier un fournisseur dont l'efficacité est proche de celle de son propre outil industriel que soi.

## VII. 3. **Perspectives**

Il faut, un jour, en arriver à la conclusion même si les limites de nos travaux n'ont pas été atteintes. De nombreuses perspectives de recherches sont envisageables : certaines à court terme, d'autres à long terme.

### VII.3.1 A court terme

Nos recherches sont basées sur une politique de stockage liée à un taux de service au client final de 100%. Nous pourrons envisager d'autres politiques et en analyser les impacts sur notre modèle. De même, nous avons choisi comme moyens de transport, le camion, le bateau

et l'avion. D'autres possibilités seraient à exploiter comme le train ou encore le transport fluvial.

### VII.3.2 A long terme

Deux autres perspectives sont imaginables à plus long terme :

- Nous n'avons pas pris en compte les émissions d'équivalent $CO_2$ liées au fonctionnement d'une usine. Or, une entreprise d'efficacité moindre, par exemple, a un taux de rebut plus élevé. Ceci engendre de nouvelles fabrications et donc de nouvelles pollutions. Nous pourrions étudier cet impact. Cependant, ces travaux nécessiteraient une recherche importante sur les émissions de fonctionnement d'une entreprise. Il faudrait ensuite réaliser une moyenne de ces rejets.
- Dans notre thèse, nous n'avons considéré que deux paramètres sur trois du développement durable. Nous n'avons pas traité du volet social. Il serait intéressant d'étudier quels indicateurs seraient configurables dans notre modèle. Ainsi, nous étudierions une performance globale de la chaîne logistique : économique, environnementale et sociétale.

Ce travail peut donc devenir le socle de nombreuses recherches futures dans un domaine encore très ouvert et pour lequel les décideurs sont en forte demande.

# BIBLIOGRAPHIE

1999. The triple bottom line. Inc., 21, 108.
2004. Science humaines. . Encyclopédie Universalis.
2008a. 2016 : Future supply chain. Cap Gemini.
2008b. http://www.copilotes.eu/1-196-Caracterisation-d-une-chaine-logistique.php [Online]. [Accessed].
ACCENTURE 2007. Les enjeux économiques et financiers du développement durable : une enquête exclusive auprès des entreprises françaises.
AHMAD, M. M. & DHAFR, N. 2002. Establishing and improving manufacturing performance measures. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 18, 171-176.
AKBARI JOKAR, M. R., FREIN, Y. & DUPONT, L. Year. Sur l'évolution du concept de logistique. In: RIRL 2000 : les troisièmes rencontres internationales de la recherche en logistique, 9-10-11 mai 2000 2000 Trois-Rivières.
AKONO, D. & FERNANDES, V. 2009. Impacts du développement durable sur les organisations logistiques. (French). Revue Management et Avenir, 241-255.
ALFORD, L., MILLER, P. & SWANSTROM, M. 2005. The effect of supply chain management on stock performance and valuation of large manufacturers. Peer rewieved.
ANDERSON, L. D., BRITT, E. F. & FAVRE, J. D. 1997. The seven principles of supply chain management. Suppy chain management rewiew, 31-41.
ARRHENIUS, S. 1896. On the influence of carbonic acid in the aire upon the temperature of the ground. Philosophical magazine and journal of science, 41, 237-276.
ARSHAM, H. 2000. The use of simulation in discrete-event dynamic systems design. International Journal of Systems Science, 31, 563.
AYRES, R. U. & KNEESE, A. V. 1969. Production, Consumption, and Externalities. American Economic Review, 59, 282.
BABAI, M. Z. & DALLERY, Y. Year. Impact de l'information sur la demande sur le choix du mode de pilotage de flux dans la chaîne logistique. In: 5ème Conférence Francophone de MOdélisation et SIMulation, 2004 Nantes.
BANKS J. 1998. Handbook of Simulation : Principles, Methodology, Advances, Applications, and Pratice, New York, John Wiley.
BARUT, M., FAISST, W. & KANETT, J. J. 2002. Measuring supply chain coupling : an information system perspective. European Journal of Purchasing and Supply Management, 8, 161-171.
BEAMON, B. M. 1998. Supply chain design and analysis : models and methods. International Journal of Production Economics, 55, 281-294.
BEAMON, B. M. 1999. Measuring supply chain performance. International Journal of Operations & Production Management, 19, 275-292.
BEAMON, B. M. 2005. Environmental and Sustainability Ethics in Supply Chain Management. Science and Engineering Ethics, 11, 221-234.
BELLASEN, V. & LEGUET, B. 2007. The emergence of volontary carbone offsetting. Note d'étude de la Mission Climat de la Caisse des Dépôts. Caisse des Dépôts.
BELLASEN, V. & LEGUET, B. 2008. Comprendre la compensation carbone, Paris, Pearson.
BERNARD, Y. 2009. L'ÉTIQUETAGE ENVIRONNMENTAL DES PRODUITS EN MAGASIN. (French). PRODUCTS' ENVIRONMENTAL LABELLING INTO THE STORES. (English), 63-83.
BERRY, W. L. & HILL, T. 1992. Linking systems to strategy. International Journal of Operations & Production Management, 12, 3-15.

BESCOS, P. L., DOBLER, P., MENDOZA, C. & NAULLEAU, G. 1995. Contrôle de gestion et management, Paris.

BHOTE, K. 1989. Strategic Supply Management, New-York, AMACOM.

BLOEMHOF-RUWAARD, J. M., VAN BEEK, P. & VAN WASSENHOVE, L. N. 1995. Interactions between operational research and environmental management. European Journal of Operational Research, 85**,** 229-243.

BLOEMHOF-RUWAARD, J. M., VAN WASSENHOVE, L. N., GABEL, H. L. & WEAVER, P. M. 1996. An environmental life cycle optimization model for the European pulp and paper industry. Omega 20**,** 615-629.

BOSTEL, DEJAX & LU 2005. The Design, Planning, and Optimization of Reverse Logistics Networks. Logistics Systems: Design and Optimization. Springer.

BOUQUIN, H. 5ème édition 2001. Le contrôle de gestion, Paris, Presses universitaires de France.

BOWEN, F. E., COUSINS, P. D., LAMMING, R. C. & FARUK, A. C. 2001. Horses for Courses. Greener Management International**,** 41.

BOWERSOX, D. J. 1969. Readings in physical distribution management : the logistics of marketing, New York, Bowersox, D.J., Lalonde, B.J., Smykay, E.W. eds.

BRENT, A. C. & VISSER, J. K. 2005. An environmental performance resource impact indicator for life cycle management in the manufacturing industry. Journal of Cleaner Production, 13**,** 557-565.

BROECKER, W. S. & KUNZIG, R. 2008. Fixing climate : what past climate changes reveal about the current threat and how to counter it, New York, Hill and Wang.

BUGHIN, C. 2006. Les mesures non financières reflètent-elles la performance financière future de l'entreprise? Le pouvoir prédictif de la satisfaction du client. Gestion 2000, Mars-avril**,** 11-129.

BUSCH, T. & HOFFMANN, V. H. 2007. Emerging carbon constraints for corporate risk management. Ecological Economics, 62**,** 518-528.

CAMISULLIS, C. & GIARD, V. 2008. The New Need for Safety Stocks in a Supply Chain Dedicated to Customized Mass Production. Supply Chain Forum: International Journal, 9**,** 88-96.

CAPAR, I., ULENGRIN, F. & REISMAN, A. 2003. A taxonomy for supply chain management litterature. papers.ssm.com [Online].

CARBONE, V. & MEUNIER, C. Year. Supply chain management : portée et limites. L'apport de théories des réseaux. In: 15ème conférence internationale de management scientifique, 2006.

CARTER, C. R., KALE, R. & GRIMM, C. M. 2000. Environmental purchasing and firm performance: an empirical investigation. Transportation Research: Part E, 36**,** 219.

CARTER, C. R. & ROGERS, D. S. 2008. A framework of sustainable supply chain management: moving toward new theory. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 38**,** 360-387.

CASTKA, P. & BALZAROVA, M. A. 2008. ISO 26000 and supply chains—On the diffusion of the social responsibility standard. International Journal of Production Economics, 111**,** 274-286.

CHAABANE, A., RAMUDHIN, A. & PAQUET, M. 2010. Design of sustainable supply chains under the emission trading scheme. International Journal of Production Economics.

CHAN, F. T. S. 2003. Interactive selection model for supplier selection process: an analytical hierarchy process approach. International Journal of Production Research, 41**,** 3549-3579.

CHARDINE-BAUMANN, E. & BOTTA-GENOULAZ, V. 2009. Prise en considération des problématiques des chaînes logistiques durables dans les référentiels d'évaluation de performance. Logistique et Management, 17, 31-47.

CHENG, S., CHAN, C. W. & HUANG, G. H. 2003. An integrated multi-criteria decision analysis and inexact miwed integer linear programming approach for solid waste management. Engineering Application of Artificial Intelligence, 16, 543-554.

CHEYROUX L. 2003. Sur l'évaluation de performances des chaînes logistiques. Institut national polytechnique de Grenoble.

CHIDAMBARAM, S. Year. A Supply Chain Transformation Methodology. In: Proceedings of The 4th Annual International Conference on Industrial Engineering Theory, Applications and Practice, 1999 San Antonio, Texas, USA.

CHIDAMBARAM, S., WITHMAN, L. & HOSSEIN CHERAGHI, S. Year. A supply chain transformation methodology. In: 4th annual international conference on industrial engineering theory, applications and practice, 1999.

CHIEN, M. K. & SHIH, L. H. 2007. An empirical study of the implementation of green supply chain management practices in the electrical and electronic industry and their relation to organizational performances. International Journal Environ. SCI. Tech., 4, 383-394.

CHIRAC, J. 2002. RE: Déclaration lors du Sommet Mondial du Développement Durable de Johannesburg.

CHLADNÁ, Z. 2007. Determination of optimal rotation period under stochastic wood and carbon prices. Forest Policy & Economics, 9, 1031-1045.

CHOLETTE, S. & VENKAT, K. 2009. The energy and carbon intensity of wine distribution: A study of logistical options for delivering wine to consumers. Journal of Cleaner Production, 17, 1401-1413.

CHRISTOPHER, M. 1992. Logistics and supply chain management, London, Pitman.

CIGOLINI, R. & TURCO, F. 1997. Total productive maintenance practices : a survey in Italy. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 3, 259-272.

CORBETT, C. J. & KLASSEN, R. D. 2006. Extending the Horizons: Environmental Excellence as Key to Improving Operations. Manufacturing & Service Operations Management, 8, 5-22.

COURTOIS, A., PILLET, M. & MARTIN-BONNEFOUS, C. 2006. Gestion de production, Paris, Groupe Eyrolles.

CROCKER, T. 1966. The structuring of atmospheric pollution control systems. The economics of air pollution. New York: Harold Wolozin editions.

DALES, J. 1968. Pollution, property, and prices, Toronto, Ontario, University Press.

DE BRITO, M. P., CARBONE, V. & MEUNIER BLANQUART, C. 2008. Towards a sustainable fashion retail supply chain in Europe : organisation and performance. International Journal of Production Economics, 114, 534-553.

DE PERTHUIS, C. 2008. Le puzzle des marchés du carbone. Pour la science, 365.

DE PERTHUIS, C. 2009. Et pour quelques degrés de plus...Nos choix économiques face au risque climatique, Paris, Pearson Education France.

DE TONI, A. & NASSIMBENI, G. 2001. A method for the evaluation of suppliers' co-design effort. International Journal of Production Economics, 72, 169-180.

DELBOSC, A. & DE PERTHUIS, C. 2009. Les marchés du carbone expliqués. ONU.

DERWALL, J., GUENSTER, N., BAUER, R. & KOEDIJK, K. 2005. The Eco-Efficiency Premium Puzzle. Financial Analysts Journal, 61, 51-63.

DIAKHATE, M. 2006. La finance carbone : en quoi le marché du CO2 peut-il être un outil au service de la performance des entreprises? , INSEEC-PARIS.

DUBOSE, J., FROST, J. D., CHAMAEAU, J. A. & VANEGAS, J. A. 1995. Sustainable development and thechnology. The Environmentally Educated Engineer. Canterbury : Center for Advanced Engineering: D.Elms and D.Wilkinsin editions.

DYLLICK, T. H., K. 2002. BEYOND THE BUSINESS CASE FOR CORPORATE SUSTAINABILITY. Business Strategy and the Environment, 11**,** 130-141.

ELLERMAN, A. D., CONVERY, F. J. & DE PERTHUIS, C. 2010. Le prix du carbone, Paris, Pearson.

ERARD, P.-J. & DÉGUÉNON, P. 1996. Simulation à événements discrets, Lausanne, Presses polytechnique et universitaire romandes.

ERKMAN, S. 1997. Industrial Ecology : an historical review. Journal of Cleaner Production, 5**,** 1-10.

ESSAÏD, M. 2008. *Modélisation et simulation de la connectivité des flux logistiques dans les réseaux manufacturiers*. Ecole des Mines de Saint-Etienne.

ESSAÏD M. 2008. Modélisation et simulation de la connectivité des flux logistiques dans les réseaux manufacturiers. Ecole des Mines de Saint-Etienne.

ESTAMPE, D. 2009. Modèle d'évaluation des performances Supply Chain : outil de mesure de la création de valeur. Ecole Centrale.

EYMERY, P. 2003. La stratégie logistique, Paris, PUF.

FABBE-COSTES, N. 2007. La gestion des chaînes logistiques multi-acteurs : les dimensions organisationnelles d'un gestion lean et agile. In: PACHÉ G., S. A. (ed.) La gestion des chaînes logistiques multi-acteurs : perspectives stratégiques. Presses universitaires de Grenoble.

FAUCHEUX, S. & JOUMNI, H. 2005. Economie et politique des changements climatiques, Paris, La découverte.

FAWCETT, S. E. & MAGNAN, G. M. 2002. The rhetoric and reality of supply chain integration. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 32**,** 339.

FELDMAN, D. C. 1991. The Age of Unreason (Book). Human Resource Planning, 14**,** 235.

FERRETTI, I., ZANONI, S., ZAVANELLA, L. & DIANA, A. 2007. Greening the aluminium supply chain. International Journal of Production Economics, 108**,** 236-245.

FLEISCHMANN, M., BEULLENS, P., BLOEMHOF-RUWAARD, J. M. & VAN WASSENHOVE, L. N. 2001. The impact of product recovery on logistics network design. Production & Operations Management, 10**,** 156-173.

FORAN, B., LENZEN, M., DEY, C. & BILEK, M. 2005. Integrating sustainable chain management with triple bottom line accounting. Ecological Economics, 52**,** 143.

FROHLICH, M. & WESTBROOK, R. 2001. Arcs of integration : an international study of supply chain strategies. Journal of Operations Management, 19**,** 185-200.

FUGLESTVEDDT, J. S., BERNTSEN, T. K., GODAL, O., SAUSEN, S., SHINE, K. P. & SKODVIN, T. 2003. Metrics of climate change : assessing radiative forcing and emissions indices. Climate change, 58**,** 267-331.

GENIN, P., LAMOURI, S. & THOMAS, A. La planification et ses limites. Les techniques de l'ingénieur.

GIARD, V. 2005. Gestion de la production et des flux, Paris

Economica.

GIEC 2000. Special Report on Emissions Scenarios

GIEC 2007a. Climate Change 2007.

GIEC. 2007b. Extrait du rapport accepté par le groupe de travail I, questions fréquentes. Available: http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-faqs-fr.pdf.

GORANSON, T., JONHSON, M., PRESLEY, A. & ROGERS, H. J. Year. Metrics for the Agile Virtual Enterprise Case Study. In: 6th Annual National Agility Conference, 1997 San Diego.

GRUAT LA FORME-CHRÉTIEN , F.-A. 2007. Référentiel d'évaluation de la performance logistique, application à une entreprise d'ameublement. INSA.

GRUAU, V. 2009. Les enjeux de la relocalisation. (French). Logistique & Management, 17**,** 85-87.

GUNASEKARAN, A. & KOBU, B. 2007. Performance measures and metrics in logistics and supply chain management: a review of recent literature (1995-2004) for research and applications. International Journal of Production Research, 45**,** 2819-2840.

GUNASEKARAN, A., PATEL, C. & MCGAUGHEY, R. E. 2004. A framework for supply chain performance measurement. International Journal of Production Economics, 87**,** 333.

GUYONNAUD, M.-F. & WILLARD, F. 2004. Du management environnemental au développement durable des entreprises. ADEME.

HAMMAMI, A. 2003. Modélisation technico-économique d'une chaîne logistique dans une entreprise réseau. Ecole supérieure des Mines de Saint-Etienne, France et Faculté des Sciences de Génie de Laval, Canada.

HAMMOND, A., ADRIAANSE, A., RODENBURG, E., BRYANT, D. & WOODWARD, R. 1995. Environmental indicators : a sytematic approach to measuring and reporting on environmental policy perfromance in the context of sustainable development. World Resources institute.

HANDFIELD, R., WALTON, S. V., SROUFE, R. & MELNYK, S. A. 2002. Applying environmental criteria to supplier assessment: A study in the application of the Analytical Hierarchy Process. European Journal of Operational Research, 141**,** 70-87.

HANSEN, J., SATO, M., KHARECHA, P., BEERLING, D., BERNER, R., MASSON-DELMOTTE, V., PAGANI, M., RAYMO, M., ROYER, D. L. & ZACHOS, J. C. 2008. Target atmospheric $CO_2$ : where should humanity aim ? [Online]. Available: arvix.org/ftp/arvix/paper.0804/0804.1126.pdf [Accessed 02/03/2011].

HARLAND, C. M. 1996. Supply Chain Management: Relationships, Chains and Networks. British Journal of Management, 7.

HARLAND, D. & SCHARLACKEN, W. J. Year. Global supply chain planning : synchronizing operations and logistics with the pulse of the international market place. In: 40th APICS, 1997. p. 211-219.

HARREL, C. & TUMAY, K. 1994. Simulation made easy, Engineering and Management Press.

HELLSTRÖM J. & JOHNSSON M. Year. Using discrete-event simulation in supply chain planning. In: The 14th Annual Conference for Nordic Researchers in Logistics, 2002.

HINES, P. 1994. Creating World Class Suppliers : Unlocking Mutual Competitive Advantage, Financial Times Management.

HOUE, R. & GRABOT, B. 2009. Assessing the compliance of a product with an eco-label: From standards to constraints. International Journal of Production Economics, 121**,** 21-38.

HUI K., SPEDDING T.A., BAINBRIDGE I. & TAPLIN D.M. 2006. Creating a green supply chain : a simulation and a modeling approach. In: SPRINGER (ed.) Greening the supply chain by J. Sarkis. London.

INGALLS, R. G. Year. The value of simulation in modeling supply chains. In: Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference, 1998. 1371-1375.

JANCOVICI, J.-M. 2002. L'avenir climatique, Paris, Seuil.

JONSSON, P. & LESSHAMMAR, M. 1999. Evaluation and improvement of manufacturing performance measurement systems - the role of OEE. International Journal of Operations & Production Management, 19**,** 55-78.

KAINUMA, Y. & TAWARA, N. 2006. A multiple attribute utility theory approach to lean and green supply chain management. International Journal of Production Economics, 101**,** 99-108.

KANNAN, G., NOORUL HAQ, A., SASIKUMAR, P. & ARUNACHALAM, S. 2008. Analysis and selection of green suppliers using interpretative structural modelling and analytic hierarchy process. International Journal of Management & Decision Making, 9**,** 1-1.

KIERNAN, M. J. 2001a. Eco-Value, Sustainability, and Shareholder Value: Driving Environmental Performance to the Bottom Line. Environmental Quality Management, 10**,** 1-12.

KIERNAN, M. J. 2001b. Eco-Value, Sustainability, and Shareholder Value: Driving Environmental Performance to the Bottom Line. Environmental Quality Management, 10**,** 1.

KIM, C. S., TANNOCK, J., BUYRNE, M., FARR, R., CAO, B. & ER, M. 2004. State of the art review : techniques to model the supply chain in an extended enterprise. Operations management division University of Nottingham.

KING A. & LENOX M. 2001. Does it really pay to be green? An empirical study of firm environnmental and financial performance. The Journal of Industrial Ecology.

KLASSEN R-D & MCLAUGHLIN C. 1996. The impact of environmental management on firm performance. Management Science, 42**,** 1199-1214.

KLEIJNEN, J. P. C. & SMITS, L. T. 2003. Performance metrics in supply chain management. Journal of the Operational Research Society, 0**,** 1-8.

KONOPKA, J. & TRYBULA, W. Year. Overall Equipment Effectiveness (OEE) and cost. In: IEEE/CPMT-Electronics Manufacturing Technology Symposium, 1996.

KOSKELA, L. & VRIJHOEF, R. Year. Roles of supply chain management in construction. In: IGLC-7, 1999 University of California, Berkeley, USA.

KUO, T.-C., HUANG, S. H. & ZHANG, H.-C. 2001. Design for manufacture and design for 'X': concepts, applications, and perspectives. Computers & Industrial Engineering, 41**,** 241.

LAMBERT, D. M. & COOPER, M. C. 2000. Issues in Supply Chain Management. Elsevier Science Inc.

LAMBERT, D. M., COOPER, M. C. & PAGH, J. D. 1997. Supply chain management : More Than a New Name for Logistics. The International Journal of logistics Management**,** 1-13.

LAMBERT, D. M., COOPER, M. C. & PAGH, J. D. 1998. Supply Chain Management: Implementation Issues and Research Opportunities. International Journal of Logistics Management, 9**,** 1.

LAMMING, R. & HAMPSON, J. 1996. The Environment as a Supply Chain Management Issue. British Journal of Management, 7.

LARSON, A. L., TEISBERG, E. O. & R.R., J. 2000. Sustainable business : opportunity and value creation. Interfaces, 30**,** 1-12.

LAURAS, M. 2004. Méthodes de diagnostic et d'évaluation de performance pour la gestion de chaînes logistiques : application à la coopération maison-mère-filiales internationales dans un groupe pharmaceutique et cosmétique. Ecole supérieure des Mines d'Albi-Carmaux.

LEACHMAN, R. C. & HODGES, D. A. Year. Benchmarking Semiconductor Manufacturing. In: IEEE/IRW Final report, 1997.

LEE, H. L. & BILLINGTON, C. 1993. Material management in decentralized supply chain. Operations Research, 41, 835-847.

LEE, K.-H. 2011. Integrating carbon footprint into supply chain management : the case of Hyundai Motor Company (HMC) in the automobile industry. Journal of Cleaner Production, 19, 1216-1223.

LU, L. Y. Y., WU, C. H. & KUO, T. C. 2007a. Environmental principles applicable to green supplier evaluation by using multi-objective decision analysis. International Journal of Production Research, 45, 4317.

LU, L. Y. Y., WU, C. H. & KUO, T. C. 2007b. Environmental principles applicable to green supplier evaluation by using multi-objective decision analysis. International Journal of Production research, 45, 4317-4331.

LUMMUS, R. R. & VOKURKA, R. J. 1999. Defining supply chain management : a historical perspective and practical guidelines. Industrial management and data sytems, 99/1, 11-17.

MAHONEY, K. 2008. Is carbon footprinting a supply chain necessity? Logistics & Transport Focus. 6 ed.: Chartered Institute of Logistics & Transport (UK).

MANRODT, K. B., COLLINS HOLCOMB, M. & THOMPSON, R. H. 1997. What's missing in supply chain management. Suppy chain management rewiew.

MATHE, H. & TIXIER, D. 2005. La logistique, Paris, PUF.

MAULÉON, F. & SILVA, F. 2009. Etats des lieux de la RSE et du développement durable en France. (French). Revue Management et Avenir, 23-35.

MEADOWS, D., MEADOWS, D. H. & RANDERS, J. 2004. Limits to growth, Chelsea Green Publishing Company.

MEBRATU, D. 1998. Sustainability and sustainable development : historical and conceptual review. Elsevier Science Inc. .

MENTZER, J. T., DEWITT, W., KEEBLER, J. S., MIN, S., NIX, N. W., SMITH, C. D. & ZACHARIA, Z. G. 2001. Defining supply chain management. Journal of Business Logistics, 22.

MILTENBURG, J. 1995. Manufacturing strategy, Portland, Oregon, Productivity Press

MIN, H. & ZHOU, G. 2002. Supply chain modeling: past, present and future Computers & Industrial Engineering, 43, 231-249.

MONCZKA, R. M. & MORGAN, J. 1997. What's wrong with supply chain management? Purchasing, 122, 69.

MORANA, J. & PACHÉ, G. 2003. Quels indicateurs de gestion pour le projet logistique ? Revue française de gestion, 147.

MOSOVSKY, J., DICKINSON, D. & MORABITO, J. 2000. Creating competitive advantgae through resource productivity, eco-efficiency, and sustainability in the supply chain. IEEE.

MUCHIRI, P. & PINTELON, L. 2008. Performance measurement using overall equipment effectiveness (OEE) : literature review and practical application discussion. International Journal of Production Research, 46, 3517-3535.

MURPHY, C. 2002. The profitable correlation between environmental and financial performance : a review of the research. www.lightgreen.com/files.pdf [Online]. [Accessed 07/04/11].

NEWMAN, W. R. & SRIDHARAN, V. 1995. Linking manufacturing planning and control to the manufacturing environment. Integrated manufacturing systems, 6, 36-42.

NIRAGU, J. 1994. Lead and lead poisoning in antiquity. Green History. London: D. Wall editions.

NUNES, P. 1994. Formes PME et Organisation en réseau. Troisième conférence internationale de Management Stratégique. Lyon.

OLHAGER, J. & RUDBERG, M. 2002. Linking manufacturing strategy decisions on process choice with manufacturing planning and control systems. International Journal of production research, 40**,** 2235-2351.

OLSTHOORN, X., TYTECA, D., WEHRMEYER, W. & WAGNER, M. 2001. Environmental indicators for business: a review of the literature and standardisation methods. Journal of Cleaner Production, 9**,** 453-463.

PACHÉ, G. & COLIN, J. 2000a. Recherche et applications en logistique : des questions d'hier, d'aujourd'hui et de demain. In: VUIBERT (ed.) Faire de la recherche en logistique et distribution. Paris.

PACHÉ, G. & COLIN, J. 2000b. Recherche et applications en logistique: des questions d'hier, d'aujourd'hui et de demain. Faire de la recherche en logistique et distribution. Paris: Vuibert.

PAGELL, M. 2004. Understanding the factors that enable and inhibit the integration of operations, purchasing and logistics. Journal of Operations Management, 22**,** 459.

PAN , S. 2010. Contribution à la définition et à l'évaluation de la mutualisation de chaînes logistiques pour réduire les émissions de CO2 du transport : application au cas de la grande distribution. Ecole Nationale Supérieure de Mines de Paris.

PELLEGRIN, C. 2001. Pilotage de la performance industrielle : cadre conceptuel. Performance industrielle et gestion des flux sous la direction de Patrick Burlat et Jean-Pierre Campagne. Paris: Lavoisier.

PIGOU, A. C. 1920. The economics of welfare, Transaction publishers.

PIRARD, F., IASSINOVSKI, S. & RIANE, F. Year. Un modèle générique de simulation pour la reconfiguration des réseaux logistique : influence des politiques de pilotage. In: 6ème Conférence Francophone de MOdélisation et SIMulation, 2006 Rabat, Maroc.

PORTER M. E. & VAN DER LINDE C. 1995. Green and competitive : ending the stalemate. Harvard Business Review, 73**,** 120.

RAO, P. & HOLT, D. 2005. Do green supply chains lead to competitiveness and economic performance? International Journal of Operations & Production Management, 25**,** 898-916.

RAUX, C., ALLIGIER, L. & DANAU, D. 2007. Simulation d'un marché de permis d'émission de $CO_2$ dans le transport de marchandises. Rapport final. Lyon: Convention ADEME, LET.

REEVE, J. M. 2002. The financial advantages of the lean supply chain. Supply Chain Management Review.

RIZET, C. & KEÏTA, B. 2005. Chaînes logistiques et consommation d'énergie : cas du yaourt et du jean. In: INRETS-DEST (ed.).

ROBINSON, D. R. & WILCOX, S. 2008. The greening of supply chains. Supply Chain Management Review, 12**,** S61.

ROTA, K., THIERRY, C. & BEL, G. 2002. Supply chain management: a supplier perspective. Production Planning & Control, 13**,** 370-380.

ROTTA-FRANZ, K., THIERRY, C. & BEL, G. 2001. Gestion de flux dans les chaînes logistiques. In: HERMÈS (ed.) Performances industrielles et gestion de flux. Paris.

SAHIN, F. & ROBINSON, E. P. 2005. Information sharing and coordination in make to order supply chain. Journal of Operations Management, 23**,** 579-598.

SALING P., KICHERER A., DITTRICH-KRÄMER B., WITTLINGER R., ZOMBIK W., SCHMIDT I. & AL 2002. Eco-efficience analysis by BASF : the method. The International Journal of Life Cycle Assessment, 7**,** 203-218.

SAMII, A. K. 1997. Mutations des stratégies logistiques en Europe, Nathan.

SARKIS, J., ZHU, Q. & LAI, K.-H. 2011. An organizational theoretic review of green supply chain management literature. International Journal of Production Economics, 130**,** 1-15.

SCHERPEREEL, C., VAN KOPPEN, C. S. A. & HEERING, G. B. F. 2001. Selecting Environmental Performance Indicators. Greener Management International**,** 97.

SENECHAL, O., MARCON, E. & BURLAT, P. 2003. Concepts pour l'évaluation de la performance des systèmes de production. Evaluation des performances des systèmes de production, Traité IC2, série Productique sous la direction de Christian Tahon. Paris: Lavoisier.

SEURING, S. & MÜLLER, M. 2008. From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management. Journal of Cleaner Production, 16**,** 1699-1710.

SHANNON, R. E. 1975. Systems simulation : the art and science, New Jersey, Prentice-Hill, Inc.

SHAPIRO, J. F. 2007. Modeling the supply chain, Duxbury, an imprint of Thomson Brooks/Cole.

SHARMAN, G. 1984. The rediscovery of logistics. Harvard Business Review, 62**,** 71.

SHEU, J.-B., CHOU, Y.-H. & HU, C.-C. 2005. An integrated logistics operational model for green-supply chain management. Transportation Research: Part E, 41**,** 287-313.

SIRACUSA G., L. R. A. D., STERLINI S.E. 2004. A new methodology to calculate the environnemental protection index. A case study applied to a company producing composite materials. Journal of Environmental Management, 73**,** 275--284.

SOYTAS, U. & SARI, R. 2009. Energy consumption, economic growth, and carbon emissions: Challenges faced by an EU candidate member. Ecological Economics, 68**,** 1667-1675.

SRIVASTAVA, S. K. 2007. Green supply-chain management: A state-of-the-art literature review. International Journal of Management Reviews, 9**,** 53.

STEINBECK, J. 1972. Les raisins de la colère, Gallimard.

STEVENS, G. C. 1989. Integration the supply chain. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 19**,** 3-8.

SUNDARAKANI, B., DE SOUZA, R., GOH, M., WAGNER, S. M. & MANIKANDAN, S. 2010. Modeling carbon footprints across the supply chain. International Journal of Production Economics, In Press, Corrected Proof.

TAN, K. C. 2001. A framework of supply chain management literature. European journal of purchasing and supply management, 7**,** 39-48.

TAYUR, S., GANESHAN, R. & MAGAZINE, M. 1999. Quantitative models for supply chain management. Kluwer Academic Publishers.

TEWOLDEBERHAN, T. W., VERBRAECK, A., VALENTIN, E. & BARDONNET, G. Year. An evaluation and selection methodology for discrete-event simulation software. In: Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference, 2002 San Diego, Calif.

THIERRY, C. 2003. Gestion de chaînes logistiques, Modèles et mise en oeuvre pour l'aide à la décision à moyen terme. Mémoire d'habilitation à mener des recherches, Université Toulouse 2 Le Mirail.

THOMAS, D. J. & GRIFFIN, P. M. 1996. Coordinated supply chain management. European Journal of Operational Research, 94**,** 1-15.

TSAY, A. A. 1999. The Quantity Flexibility Cintract and Supplier-Customer Incentives. Management Science, 45**,** 1339-1358.

TSOULFAS, G. T. & PAPPIS, C. P. 2008. A model for supply chains environmental performance analysis and decision making. Journal of Cleaner Production, 16**,** 1647.

VACHON, S. 2007. Green supply chain practices and the selection of environmental technologies. International Journal of Production Research, 45**,** 4357.

VACHON, S. & MAO, Z. 2008. Linking supply chain strength to sustainable development: a country-level analysis. Journal of Cleaner Production, 16**,** 1552-1560.

VELEVA, V. & ELLENBECKER, M. 2001. Indicators of sustainable production : frmework and methodology. Journal of Cleaner Production**,** 519-549.

WACKER, J. G. & SHEU, C. 2006. Effectiveness of manufacturing planning and control systems on manufacturing competitiveness : evidence from global manufacturing data. International Journal of Production Research, 44**,** 1015-1036.

WANG, F., LAI, X. & SHI, N. 2011. A multi-objective optimization for green supply chain network design. Decision Support Systems.

WARD, B. 1972. Nous n'avons qu'une terre, Denoël.

WATERSON, P. E., CLEGG, C., BOLDEN, R., PEPPER, K., WARR,P.B. & WALL, T. D. 1999. The use and effectiveness of modern manufacturing practices : a survey of UK industry. International Journal of Production Research, 37**,** 2271-2292.

WBCSD 2000. Measuring Eco-Efficiency : a guide to reporting company performance, Genève.

WCED 1987. Our common future, London, Oxford University Press.

WILKERSON, T. 2005. Can one green deliver another ? Harvard Businness School Publishing Corporation.

WILLMOTT, P. & MCCARTHY, D. 2001. Total productivity maintenance : a route to world-class performance, Newnes.

WU, H.-J. & DUNN, S. C. 1995. Environmentally responsible logistics systems. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 25**,** 20.

WU, L. & SONG, Y. Year. Measuring integrated supply chain performance. In: Proceedings of ICSSSM'05, 2005. 91-96.

WYLAND, B., BUXTON, K. & FUQUA, B. 2000. Simulating the supply chain. IIE Solutions, 32**,** 37.

ZHANG, L., ENGRAND, N. & MAYER, X. 2007. Comment l'approche de la Supply Chain Durable peut-elle rendre l'entreprise plus performante et permettre ainsi la création de valeur? Mastère spécialisé/3ème cycle Mémoire de recherche, ESC Bretagne Brest.

ZHU, Q. & GENG, Y. 2001. Integrating Environmental Issues into Supplier Selection and Management. Greener Management International**,** 27.

ZHU, Q. & SARKIS, J. 2004. Relationships between operational practices and performance among early adopters of green supply chain management practices in Chinese manufacturing enterprises. Journal of Operations Management, 22**,** 265-289.

ZHU, Q., SARKIS, J. & LAI, K.-H. 2008. Green supply chain management implications for “closing the loop”. Transportation Research: Part E, 44**,** 1-18.

http://www.undp.org/french/

http://www.unep.org/Documents.Multilingual/Default.asp?DocumentID=97&ArticleID=1503&l=fr

http://www.france.diplomatie.gouv.fr/fr/IMG/pdf/dconvfr.pdf

http://www.france.diplomatie.gouv.fr/fr/IMG/pdf/dkpfr.pdf

# ANNEXES

# Chapitre I COMPLEMENTS

## I. 1. **Définition du stock**

Les inconvénients des stocks sont par exemple : fiabilité du besoin en stock, mobilisation de surface, coût financier. Il existe quatre types de stocks : matières premières, en-cours, produits finis et pièces de rechange. La nature de ceux-ci peut-être différente : voulue, subie. Parmi les stocks voulus, nous pouvons citer les stocks nécessaires pour compenser les pannes de machines, les irrégularités de qualité, les délais de transport, etc. Il faut donc optimiser le niveau de stock. Celui-ci a comme évolution classique :

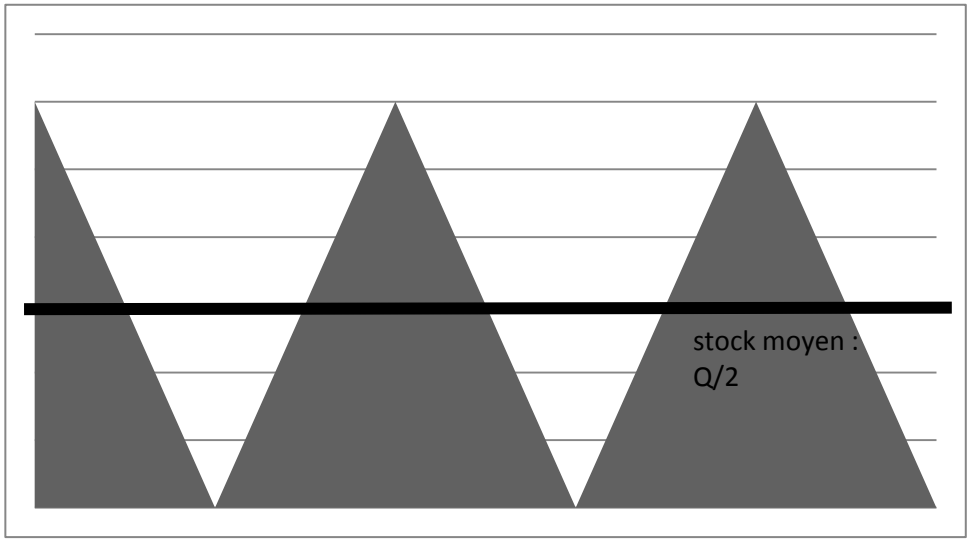



Figure 77 : Evolution du stock

La quantité maximale du stock correspond à une quantité Q. Puis le niveau de stock diminue. Le stock moyen observé est donc de Q/2. Afin de satisfaire les niveaux de stock, il faut se réapprovisionner.

## I. 2. **Réapprovisionnement**

Il existe quatre modes de réapprovisionnements :

| | **Période fixe** | **Période variable** |
|---|---|---|
| **Quantité fixe** | 1.Réapprovisionnement fixe | 3.Point de commande |
| **Quantité variable** | 2.Recomplètement périodique | 4.Par dates et quantités variables |

Tableau 59 : Méthodes d'approvisionnement

1.Lors d'un réapprovisionnement fixe, une quantité est commandée tous les temps t. Un stock de sécurité est prévu. Les quantités commandées sont alors proches des quantités dites économiques.

2.Dans le cas du recomplètement périodique, le temps T et le niveau maximal de stock S sont fixes mais les quantités sont variables. A la date t, on ne recommande que la quantité égale à la différence entre la quantité Q et le niveau de stock constaté. Cette politique est notée (T,S) (Babai and Dallery, 2004).

3.Le point de commande est le niveau de stock r qui permet de déclencher l'ordre d'approvisionnement. Il prend en compte les délais d'approvisionnement grâce à un stock de couverture et les aléas possibles grâce à un stock de sécurité. A ce point, une quantité économique Q est commandée. Le stock maximal n'est donc jamais le même. Si la quantité commandée ajoutée au stock ne dépasse par le point de commande, il faut prévoir une seconde commande pour atteindre ce point. On note cette politique (r,Q).

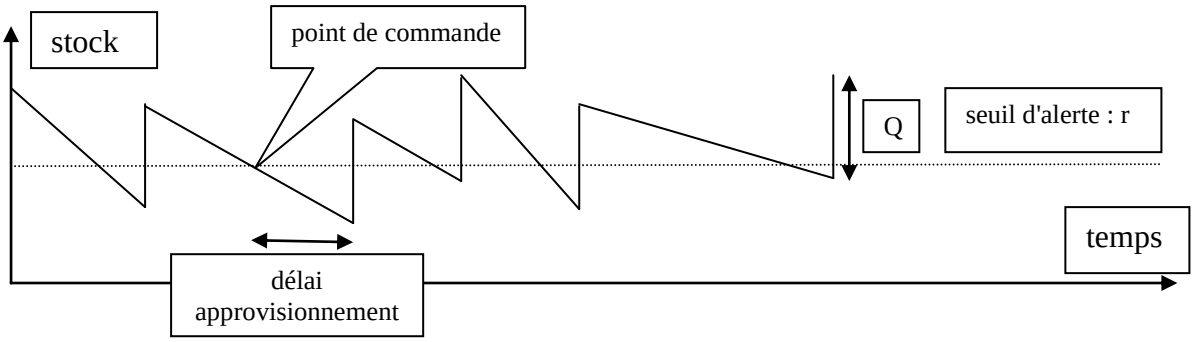



Figure 78 : Explication du point de commande

4. Cette méthode n'est utilisée que pour des produits très coûteux ou très encombrants.

Des variantes de ces quatre méthodes ont été développées. De plus, il existe une autre méthode tenant compte de l'activité d'approvisionnement : Material Requirements Planning (MRP). Celle-ci a évolué en MRP2 (Manufacturing Resource Planning) avec une prise en compte des ressources humaines et des besoins en matériel. Cette évolution de l'outil nécessite la prise en compte des "gammes de fabrication". Les Entreprises Ressources Planning (ERP) permettent l'utilisation du MRP 2 pour gérer la production.

# Chapitre II RESULTATS DES ANALYSES STATISTIQUES

## II. 1. **Détails de la classification hiérarchique des 512 configurations**

| Classe | 1 | 2 | 3 |
|---|---|---|---|
| **Objets** | 80 | 216 | 216 |
| **Somme des poids** | 80 | 216 | 216 |
| **Variance intra-classe** | 92253845441476,800 | 27594697707778,000 | 19834975424740,300 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Distance minimale au barycentre** | 37944,102 | 242870,248 | 23690,339 |
| **Distance moyenne au barycentre** | 6337685,600 | 4316916,341 | 3623127,397 |
| **Distance maximale au barycentre** | 25798385,753 | 13264307,917 | 10338551,920 |
| | 1AAAcgg | 1AAAcrg | 1AAAcrl |
| | 2AAAcgg | 2AAAcrg | 2AAAcrl |
| | 3AAAcgg | 3AAAcrg | 3AAAcrl |
| | 4AAAcgg | 4AAAcrg | 4AAAcrl |
| | 1AAArgg | 1AAArlg | 1AAArlc |
| | 2AAArgg | 2AAArlg | 2AAArlc |
| | 3AAArgg | 3AAArlg | 3AAArlc |
| | 4AAArgg | 4AAArlg | 4AAArlc |
| | 1AAAlgg | 1AAArgl | 1AAArcl |
| | 2AAAlgg | 2AAArgl | 2AAArcl |
| | 3AAAlgg | 3AAArgl | 3AAArcl |
| | 4AAAlgg | 4AAArgl | 4AAArcl |
| | 1AAAgrg | 1AAArgc | 1AAAlrc |
| | 2AAAgrg | 2AAArgc | 2AAAlrc |
| | 3AAAgrg | 3AAArgc | 3AAAlrc |
| | 4AAAgrg | 4AAArgc | 4AAAlrc |
| | 1AAAglg | 1AAArcg | 1AAAlcr |
| | 2AAAglg | 2AAArcg | 2AAAlcr |
| | 3AAAglg | 3AAArcg | 3AAAlcr |
| | 4AAAglg | 4AAArcg | 4AAAlcr |
| | 1AAAggr | 1AAAlrg | 1AAAclr |
| | 2AAAggr | 2AAAlrg | 2AAAclr |
| | 3AAAggr | 3AAAlrg | 3AAAclr |
| | 4AAAggr | 4AAAlrg | 4AAAclr |
| | 1AAAggl | 1AAAlgr | 1AAArrr |
| | 2AAAggl | 2AAAlgr | 2AAArrr |
| | 3AAAggl | 3AAAlgr | 3AAArrr |
| | 4AAAggl | 4AAAlgr | 4AAArrr |
| | 1AAAggc | 1AAAlgc | 1AAArrl |
| | 2AAAggc | 2AAAlgc | 2AAArrl |
| | 3AAAggc | 3AAAlgc | 3AAArrl |
| | 4AAAggc | 4AAAlgc | 4AAArrl |
| | 1AAAgcg | 1AAAlcg | 1AAArrc |
| | 2AAAgcg | 2AAAlcg | 2AAArrc |
| | 3AAAgcg | 3AAAlcg | 3AAArrc |
| | 4AAAgcg | 4AAAlcg | 4AAArrc |
| | 1AAAggg | 1AAAgrl | 1AAArlr |
| | 2AAAggg | 2AAAgrl | 2AAArlr |
| | 3AAAggg | 3AAAgrl | 3AAArlr |
| | 4AAAggg | 4AAAgrl | 4AAArlr |
| | 1DDDcgg | 1AAAgrc | 1AAArll |

| | | |
|---|---|---|
| 2DDDcgg | 2AAAgrc | 2AAArll |
| 3DDDcgg | 3AAAgrc | 3AAArll |
| 4DDDcgg | 4AAAgrc | 4AAArll |
| 1DDDgcg | 1AAAglr | 1AAArcr |
| 2DDDgcg | 2AAAglr | 2AAArcr |
| 3DDDgcg | 3AAAglr | 3AAArcr |
| 4DDDgcg | 4AAAglr | 4AAArcr |
| 1DDDggc | 1AAAglc | 1AAArcc |
| 2DDDggc | 2AAAglc | 2AAArcc |
| 3DDDggc | 3AAAglc | 3AAArcc |
| 4DDDggc | 4AAAglc | 4AAArcc |
| 1DDDggg | 1AAAgcr | 1AAAlrr |
| 2DDDggg | 2AAAgcr | 2AAAlrr |
| 3DDDggg | 3AAAgcr | 3AAAlrr |
| 4DDDggg | 4AAAgcr | 4AAAlrr |
| 1DDDggl | 1AAAgcl | 1AAAlrl |
| 2DDDggl | 2AAAgcl | 2AAAlrl |
| 3DDDggl | 3AAAgcl | 3AAAlrl |
| 4DDDggl | 4AAAgcl | 4AAAlrl |
| 1DDDggr | 1AAAclg | 1AAAllr |
| 2DDDggr | 2AAAclg | 2AAAllr |
| 3DDDggr | 3AAAclg | 3AAAllr |
| 4DDDggr | 4AAAclg | 4AAAllr |
| 1DDDglg | 1AAAcgr | 1AAAlll |
| 2DDDglg | 2AAAcgr | 2AAAlll |
| 3DDDglg | 3AAAcgr | 3AAAlll |
| 4DDDglg | 4AAAcgr | 4AAAlll |
| 1DDDgrg | 1AAAcgl | 1AAAllc |
| 2DDDgrg | 2AAAcgl | 2AAAllc |
| 3DDDgrg | 3AAAcgl | 3AAAllc |
| 4DDDgrg | 4AAAcgl | 4AAAllc |
| 1DDDlgg | 1AAArrg | 1AAAlcc |
| 2DDDlgg | 2AAArrg | 2AAAlcc |
| 3DDDlgg | 3AAArrg | 3AAAlcc |
| 4DDDlgg | 4AAArrg | 4AAAlcc |
| 1DDDrgg | 1AAArgr | 1AAAcrc |
| 2DDDrgg | 2AAArgr | 2AAAcrc |
| 3DDDrgg | 3AAArgr | 3AAAcrc |
| 4DDDrgg | 4AAArgr | 4AAAcrc |
| | 1AAAllg | 1AAAclc |
| | 2AAAllg | 2AAAclc |
| | 3AAAllg | 3AAAclc |
| | 4AAAllg | 4AAAclc |
| | 1AAAlgl | 1AAAccr |
| | 2AAAlgl | 2AAAccr |
| | 3AAAlgl | 3AAAccr |

| | |
|---|---|
| 4AAAlgl | 4AAAccr |
| 1AAAgcc | 1AAAlcl |
| 2AAAgcc | 2AAAlcl |
| 3AAAgcc | 3AAAlcl |
| 4AAAgcc | 4AAAlcl |
| 1AAAcgc | 1AAAcrr |
| 2AAAcgc | 2AAAcrr |
| 3AAAcgc | 3AAAcrr |
| 4AAAcgc | 4AAAcrr |
| 1AAAgrr | 1AAAcll |
| 2AAAgrr | 2AAAcll |
| 3AAAgrr | 3AAAcll |
| 4AAAgrr | 4AAAcll |
| 1AAAgll | 1AAAccl |
| 2AAAgll | 2AAAccl |
| 3AAAgll | 3AAAccl |
| 4AAAgll | 4AAAccl |
| 1AAAccg | 1AAAccc |
| 2AAAccg | 2AAAccc |
| 3AAAccg | 3AAAccc |
| 4AAAccg | 4AAAccc |
| 1DDDccg | 1DDDccc |
| 2DDDccg | 2DDDccc |
| 3DDDccg | 3DDDccc |
| 4DDDccg | 4DDDccc |
| 1DDDcgc | 1DDDccl |
| 2DDDcgc | 2DDDccl |
| 3DDDcgc | 3DDDccl |
| 4DDDcgc | 4DDDccl |
| 1DDDcgl | 1DDDccr |
| 2DDDcgl | 2DDDccr |
| 3DDDcgl | 3DDDccr |
| 4DDDcgl | 4DDDccr |
| 1DDDcgr | 1DDDclc |
| 2DDDcgr | 2DDDclc |
| 3DDDcgr | 3DDDclc |
| 4DDDcgr | 4DDDclc |
| 1DDDclg | 1DDDcll |
| 2DDDclg | 2DDDcll |
| 3DDDclg | 3DDDcll |
| 4DDDclg | 4DDDcll |
| 1DDDcrg | 1DDDclr |
| 2DDDcrg | 2DDDclr |
| 3DDDcrg | 3DDDclr |
| 4DDDcrg | 4DDDclr |
| 1DDDgcc | 1DDDcrc |

| | | |
|---|---|---|
| | 2DDDgcc | 2DDDcrc |
| | 3DDDgcc | 3DDDcrc |
| | 4DDDgcc | 4DDDcrc |
| | 1DDDgcl | 1DDDcrl |
| | 2DDDgcl | 2DDDcrl |
| | 3DDDgcl | 3DDDcrl |
| | 4DDDgcl | 4DDDcrl |
| | 1DDDgcr | 1DDDcrr |
| | 2DDDgcr | 2DDDcrr |
| | 3DDDgcr | 3DDDcrr |
| | 4DDDgcr | 4DDDcrr |
| | 1DDDglc | 1DDDlcc |
| | 2DDDglc | 2DDDlcc |
| | 3DDDglc | 3DDDlcc |
| | 4DDDglc | 4DDDlcc |
| | 1DDDgll | 1DDDlcl |
| | 2DDDgll | 2DDDlcl |
| | 3DDDgll | 3DDDlcl |
| | 4DDDgll | 4DDDlcl |
| | 1DDDglr | 1DDDlcr |
| | 2DDDglr | 2DDDlcr |
| | 3DDDglr | 3DDDlcr |
| | 4DDDglr | 4DDDlcr |
| | 1DDDgrc | 1DDDllc |
| | 2DDDgrc | 2DDDllc |
| | 3DDDgrc | 3DDDllc |
| | 4DDDgrc | 4DDDllc |
| | 1DDDgrl | 1DDDlll |
| | 2DDDgrl | 2DDDlll |
| | 3DDDgrl | 3DDDlll |
| | 4DDDgrl | 4DDDlll |
| | 1DDDgrr | 1DDDllr |
| | 2DDDgrr | 2DDDllr |
| | 3DDDgrr | 3DDDllr |
| | 4DDDgrr | 4DDDllr |
| | 1DDDlcg | 1DDDlrc |
| | 2DDDlcg | 2DDDlrc |
| | 3DDDlcg | 3DDDlrc |
| | 4DDDlcg | 4DDDlrc |
| | 1DDDlgc | 1DDDlrl |
| | 2DDDlgc | 2DDDlrl |
| | 3DDDlgc | 3DDDlrl |
| | 4DDDlgc | 4DDDlrl |
| | 1DDDlgl | 1DDDlrr |
| | 2DDDlgl | 2DDDlrr |
| | 3DDDlgl | 3DDDlrr |

| | | |
|---|---|---|
| | 4DDDlgl | 4DDDlrr |
| | 1DDDlgr | 1DDDrcc |
| | 2DDDlgr | 2DDDrcc |
| | 3DDDlgr | 3DDDrcc |
| | 4DDDlgr | 4DDDrcc |
| | 1DDDllg | 1DDDrcl |
| | 2DDDllg | 2DDDrcl |
| | 3DDDllg | 3DDDrcl |
| | 4DDDllg | 4DDDrcl |
| | 1DDDlrg | 1DDDrcr |
| | 2DDDlrg | 2DDDrcr |
| | 3DDDlrg | 3DDDrcr |
| | 4DDDlrg | 4DDDrcr |
| | 1DDDrcg | 1DDDrlc |
| | 2DDDrcg | 2DDDrlc |
| | 3DDDrcg | 3DDDrlc |
| | 4DDDrcg | 4DDDrlc |
| | 1DDDrgc | 1DDDrll |
| | 2DDDrgc | 2DDDrll |
| | 3DDDrgc | 3DDDrll |
| | 4DDDrgc | 4DDDrll |
| | 1DDDrgl | 1DDDrlr |
| | 2DDDrgl | 2DDDrlr |
| | 3DDDrgl | 3DDDrlr |
| | 4DDDrgl | 4DDDrlr |
| | 1DDDrgr | 1DDDrrc |
| | 2DDDrgr | 2DDDrrc |
| | 3DDDrgr | 3DDDrrc |
| | 4DDDrgr | 4DDDrrc |
| | 1DDDrlg | 1DDDrrl |
| | 2DDDrlg | 2DDDrrl |
| | 3DDDrlg | 3DDDrrl |
| | 4DDDrlg | 4DDDrrl |
| | 1DDDrrg | 1DDDrrr |
| | 2DDDrrg | 2DDDrrr |
| | 3DDDrrg | 3DDDrrr |
| | 4DDDrrg | 4DDDrrr |

## II. 2. **Analyse de la variance sur Efficacité/localisation/type de produits**

- selon les émissions dues au stockage

  - l'effet principal de 'localisation globale' est **très significatif** (V_inter = 399383.85, V_intra = 1830046.12, F = 0.22, 1-p = >99.99%)
  - l'effet principal de 'efficacité' **n'est pas significatif** (V_inter = 1736236.59, V_intra = 1830046.12, F = 0.95, 1-p = 51.83%)
  - L'effet principal de 'type de produit' est **très significatif** (V_inter = 1466682360.80, V_intra = 26688.87, F = 54954.84, 1-p = >99.99%)
- selon les émissions dues au transport :
  - l'effet principal de 'localisation globale' est **très significatif** (V_inter = 3370528402.62, V_intra = 495953098.72, F = 6.80, 1-p = >99.99%)
  - l'effet principal de 'efficacité' **n'est pas significatif** (V_inter = 245309692.66, V_intra = 495953098.72, F = 0.50, 1-p = 12.04%)
  - L'effet principal de 'type de produit' est **très significatif** (V_inter = 245862072131.93, V_intra = 277955644.07, F = 884.54, 1-p = >99.99%)
- selon le nombre de produits stockés :
  - L'effet principal de 'localisation globale' est **très significatif** (V_inter = 514800.34, V_intra = 24504.78, F = 21.01, 1-p = >99.99%)
  - L'effet principal de 'efficacité' est **très significatif** (V_inter = 3094197.03, V_intra = 24504.78, F = 126.27, 1-p = >99.99%)
  - L'effet principal de 'type de produit' est très significatif (V_inter = 2823327.02, V_intra = 23166.86, F = 121.87, 1-p = >99.99%)
- selon le nombre de kilomètres :
  - l'effet principal de 'localisation globale' est **très significatif** (V_inter = 57012916994989552.00, V_intra = 92336269548280.06, F = 617.45, 1-p = >99.99%)
  - l'effet principal de 'efficacité' est **très significatif** (V_inter = 2174427464118515.00, V_intra = 92336269548280.06, F = 23.55, 1-p = >99.99%)
  - L'effet principal de 'type de produit' est très significatif (V_inter = 9206667280196362.00, V_intra = 322399556576570.56, F = 28.56, 1-p = >99.99%)

## II. 3. **Analyse de la variance localisation 1/3/5**

- Selon les émissions dues au stockage :
  - L'effet principal de 'localisation 1' est très significatif (V_inter = 5071121.18, V_intra = 96025.68, F = 52.81, 1-p = >99.99%)
  - L'effet principal de 'localisation 3' est très significatif (V_inter = 3257730.48, V_intra = 100479.58, F = 32.42, 1-p = >99.99%)
  - L'effet principal de 'localisation 5' n'est pas significatif (V_inter = 2859.05, V_intra = 108467.57, F = 0.03, 1-p = 1.05%)
- Selon les émissions dues au transport :
  - L'effet principal de 'localisation 1' est très significatif (V_inter = 43961319451.13, V_intra = 141687178.25, F = 310.27, 1-p = >99.99%)
  - L'effet principal de 'localisation 3' est très significatif (V_inter = 23192774516.23, V_intra = 214576905.92, F = 108.09, 1-p = >99.99%)

  - L'effet principal de 'localisation 5' n'est pas significatif (V_inter = 192144505.12, V_intra = 292981889.86, F = 0.66, 1-p = 41.68%)
- Selon le nombre de kilomètres :
  - L'effet principal de 'localisation 1' est très significatif (V_inter = 82970199650624704.00, V_intra = 220423919677541.50, F = 376.41, 1-p = >99.99%)
  - L'effet principal de 'localisation 3' est très significatif (V_inter = 57848432868678152.00, V_intra = 255269004804772.16, F = 226.62, 1-p = >99.99%)
  - L'effet principal de 'localisation 5' est très significatif (V_inter = 45912497009028392.00, V_intra = 272299683184749.47, F = 168.61, 1-p = >99.99%)
- Selon le nombre de produits stockés :
  - L'effet principal de 'localisation 1' est très significatif (V_inter = 6350892.42, V_intra = 99169.80, F = 64.04, 1-p = >99.99%)
  - L'effet principal de 'localisation 3' est très significatif (V_inter = 4354873.29, V_intra = 102175.48, F = 42.62, 1-p = >99.99%)
  - L'interaction de 'type de produit' et 'localisation 3' est significative (V_inter = 225464.61, V_intra = 102175.48, F = 2.21, 1-p = 98.08%)
  - L'effet principal de 'localisation 5' n'est pas significatif (V_inter = 2132.86, V_intra = 108091.52, F = 0.02, 1-p = 0.80%)

# Chapitre III ARTICLES PUBLIES

## III. 1. **Listes**

### III.1.1 Congrès internationaux

Jaegler A., Burlat P., "Quel paramètre a le plus d'influence sur les émissions de CO2 le long d'une chaîne logistique ?", CIGI 2011, Saint-Sauveur, Canada, oct 2011 : article accepté

Jaegler A., Burlat P., "Linking Carbon Performance and Effectiveness of Supply Chain", The Role of Collaborative Networks in Sustainability, L.M. Camarinha-Matos, X. Boucher, and H. Afsarmanesh (Eds.): PRO-VE 2010, IFIP AICT 336

Jaegler A., Burlat P., " Green Supply Chains: a Simulation Based on Carbon Analysis", 16th International Working Seminar on Production Economics, Innsbrück, Austria, March 2010, vol. 2, pp. 213-223.

### III.1.2 Congrès nationaux

JAEGLER A., BURLAT P.," Impact du développement durable sur la relocalisation des entreprises industrielles en zones périurbaines", Colloque PROPEDIA, sous l'égide de l'Observatoire Economique des Banlieues, en partenariat avec le CNAM Paris, décembre 2009, Paris.

### III.1.3 Revues internationales

"Analyzing carbon emission within supply chains: a discrete-event simulation approach": accepté en juin 2011 par Production Planning and Control

"Carbon friendly supply chains " : accepté en juillet 2011 par Production Planning and Control

## III. 2. **Articles**

### III.2.1Article accepté pour présentation à CIGI 2011

# Quel paramètre a le plus d'influence sur les émissions de $CO_2$ le long d'une chaîne logistique ?

ANICIA JAEGLER[1,2] , PATRICK BURLAT[2]

[1] IDRAC CENTER OF APPLIED RESEARCH, IDRAC ECOLE SUPERIEURE DE COMMERCE
47 rue Sergent Berthet, CP 607, 69258 Lyon Cedex, France
anicia.jaegler@idraclyon.com

[2] LABORATOIRE EN SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION, INSTITUT HENRI FAYOL, ECOLE DES MINES DE SAINT-ETIENNE
158, Cours Fauriel, 42023 Saint-Etienne Cedex 2, France
lagier-jaegler@emse.fr, burlat@emse.fr

***Résumé*** **- Les entreprises sont, de plus en plus, poussées à analyser leurs émissions de carbone. Notre recherche s'intéresse donc à celles-ci quand elles sont dues au transport et au stockage le long de la chaîne logistique. Pour ce faire, nous avons développé un modèle utilisant la simulation à événements discrets. L'outil proposé modélise une stratégie de réponse à la demande et coordonne les flux en Make To Stock. Trois paramètres variables sont pris en compte : la performance industrielle avec l'utilisation d'un taux de rendement synthétique, la localisation des entreprises et le type de produits fabriqués. Les données des produits sont issues de l'entreprise Carrier, fabriquant de climatiseurs. Différents scénarii, à politique industrielle homogène, type de produits différents et localisations dégradées sont simulés. L'objectif est de comparer les critères environnementaux (émissions de carbone) mais aussi financiers (niveau de stock, kilométrage) de ces configurations. Cette méthode est appliquée aux secteurs mécanique et plasturgique. Les principaux objectifs de l'étude sont les suivants : développer des références pour la simulation de chaîne logistique et conduire des expériences pertinentes afin d'optimiser les chaînes logistiques vertes.**

***Abstract*** **- Rendering the supply chain more eco-friendly is an innovative idea progressively adopted by industry. Our research focuses on the $CO_2$ emissions along the supply chain due to freight energy use and storage. A supply chain approach by using a discrete event model was developed. Our proposed tool is able to model Re Order Point production management policy (ROP). Moreover, it can consider the main demand response strategy Make To Stock (MTS). Manufacturing capability is also taken into account using an Overall Equipment Effectiveness indicator (OEE). In addition, the location of the firms and their type of products are modeled. The product data are from Carrier, a cool manufacturer. Simulations were conducted by varying the manufacturing capacity, the type of product and degrading the firm location in MTS environment and a ROP planning policy. The purpose is to compare supply chain $CO_2$ emissions and financial elements of different configurations. This method is applied to mechanical and plastic industries. The principle objectives of the study are twofold: develop a supply chain simulation benchmark and conduct pertinent experiments to improve green supply chains.**

***Mots clés*** **- simulation, émissions de $CO_2$, chaîne logistique**
***Keywords*** **- simulation, carbon emissions, supply chain**

## 1 INTRODUCTION

La gestion de la chaîne logistique intéressa les entreprises dès les années 80 tandis qu'à la même époque, l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature donna la première définition du développement durable qui passa presque inaperçu (Mebratu, 1998). En 1987, le rapport Bruntland introduit la définition de « développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs » (Bruntland, 1987). Les entreprises ont commencé à adopter ce concept ces dernières décennies car il leur permet de se différencier de leurs concurrents. Cette tendance a pour résultats l'amélioration de facteurs environnementaux et sociaux, la réduction des coûts et même l'augmentation de leur compétitivité. Aujourd'hui, le développement durable prend habituellement en compte trois paramètres : le progrès social, l'environnement et l'économie.

Or, la chaîne logistique manque encore d'outils conceptuels pour comprendre la complexité des liens entre les indicateurs industriels (principalement stocks et délais) et l'impact environnemental d'une gestion quotidienne. Par exemple, depuis 1993, Carrier (groupe UTC), un grand fabricant de climatiseurs, s'est employé à réduire son empreinte écologique. En 2003, l'Agence Américaine pour la Protection de l'Environnement l'a reconnu comme leader dans la protection environnementale. Il fabrique des produits innovants en travaillant sur la diminution de consommation d'eau et d'énergie. A présent, un autre axe de travail est le choix des fournisseurs comme le préconise (Seuring and Müller, 2008).

Dans ce contexte, notre article étudie comment la localisation et l'efficience des fournisseurs influence la performance industrielle et la performance environnementale d'une chaîne logistique. Ainsi, notre modèle composé de trois entreprises

manufacturières s'adressant à un client final permet d'évaluer les émissions de $CO_2$ tout au long de cette chaîne logistique. Différents scénarii peuvent être générés pour comparer ces émissions. Un des objectifs est de déterminer le poids d'une dégradation des localisations des fournisseurs ou de l'entreprise elle-même dans les émissions de $CO_2$. Pour ce faire, une simulation à événements discrets associe les paramètres standards d'une chaîne logistique. Celle-ci sera composée d'entreprises d'efficience homogène choisie entre quatre possibles. Les trois entreprises fabriquent un produit parmi quatre types (dépendants de leur poids et de leur encombrement) et ont quatre choix d'implantation. Nous évaluons les résultats de la chaîne logistique en termes de niveau de stocks, de nombre de kilomètres parcourus et d'émissions de $CO_2$ dues au transport et au stockage.

L'article est organisé comme suit : la section 2 présente un bref état de l'art sur la modélisation et la simulation d'une chaîne logistique verte. La section 3 propose un modèle de chaîne logistique. La section 4 explique comment la bibliothèque du modèle a été définie. La section 5 présente la configuration et la calibration du simulateur et l'approche expérimentale. La section 6 montre les principaux résultats. La section 7 approfondit les résultats et donne des perspectives de gestion. Enfin, la conclusion fournit des perspectives de futures recherches.

## 2 ETAT DE L'ART DE LA MODELISATION ET DE LA SIMULATION D'UNE CHAINE LOGISTIQUE VERTE

Les entreprises sont de plus en plus poussées par leurs clients, leurs actionnaires et les gouvernements à adopter des mesures environnementales (Akono and Fernandes, 2009). Pour (Carter and Rogers, 2008), il existe un lien entre performances environnementale et économique voire sociétale. De plus, plusieurs auteurs montrent de manière empirique que ce lien est positif (King A. and Lenox M., 2001), (Klassen R-D and McLaughlin C., 1996), (Porter M. E. and Van der Linde C., 1995). D'autres articles établissent une relation entre initiatives vertes et augmentation de la compétitivité mais n'ont pas assez de preuves pour en mesurer l'importance (Rao and Holt, 2005), (Kiernan, 2001).

Pour évaluer la performance environnementale, des indicateurs verts ont été étudiés (Brent and Visser, 2005), (Siracusa G., 2004), (Scherpereel et al., 2001), (Tsoulfas and Pappis, 2008). En plus de cela, (Saling P. et al., 2002) ont mené une analyse d'éco-efficience. Dans leur étude, ils indiquent que les trois principaux facteurs sont les émissions et les consommations d'énergie et de matières premières (approximativement 20% chacun). De plus, parmi les émissions, les émissions aériennes comptent pour 50%. Pour celles-ci, le $CO_2$, gaz à effet de serre, est la mesure de référence. Selon le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC), le principal problème auquel la planète doit et devra faire face est le réchauffement climatique résultant de l'augmentation des émissions de $CO_2$ (Soytas and Sari, 2009). Le Protocole de Kyoto a quantifié, pour les pays signataires, ces émissions en 1997.

(Srivastava, 2007) écrit qu'il faudrait plus de recherches pour soutenir l'écologisation de l'ensemble d'une chaîne logistique. Pour cette dernière, (Rizet and Keïta, 2005) et (Cholette and Venkat, 2009) montre que le transport et le stockage compterait pour 50% dans son impact environnemental.

En se basant sur la littérature mentionnée ci-dessus, notre recherche se concentre donc sur les émissions de $CO_2$ dues au transport et au stockage le long d'une chaîne logistique.

Une étude de (Vachon and Mao, 2008) montre que la performance industrielle d'une chaîne logistique et un niveau faible d'émissions de gaz à effet de serre (principalement le $CO_2$) sont positivement liés. Pour (Sundarakani et al., 2010), ces émissions le long de la chaîne logistique sont un élément crucial à prendre en compte.

Un article basé sur une analyse à classification hiérarchique (AHP) propose de faire évaluer la chaîne logistique d'un point de vue environnemental par un groupe Delphi d'experts environnementaux (Handfield et al., 2002). Cette méthode a été complétée en incluant un point de vue managérial (Lu et al., 2007). Mais l'AHP semble avoir quelques limites : il n'y a pas de hiérarchie simple pour la plupart des critères et le point de vue humain peut biaiser les résultats. (Chan, 2003) et (Kannan et al., 2008) utilisent un modèle appelé Modèle de Sélection Interactive qui automatise les étapes de l'implémentation de l'AHP. Mais toutes ces études reposent sur des analyses statistiques basées sur des données collectées. Ceci réduit les cas et requiert une grande qualité des données. Ces limitations nous ont motivé à proposer une autre approche méthodologique basée sur une simulation à événements discrets.

La méthode par simulation prend de plus en plus de place autant en recherches qu'en industries. En effet, l'un des avantages de la simulation est de pouvoir tester des scénarii avant de les appliquer réellement (Banks J., 1998). Cette capacité à évaluer des scénarii « que se passe-t-il si ? » avec un grand panel d'entrées fait de la simulation un outil très utile pour l'analyse des chaînes logistiques (Hellström J. and Johnsson M., 2002). Certains auteurs argumentent que l'actuelle popularité de la simulation est due à son excellente capacité à évaluer des systèmes variables et interdépendants (Wyland et al., 2000). Cela permet aux preneurs de décisions de choisir entre différentes solutions en connaissant l'impact de leur choix sur tous les maillons de la chaîne logistique.

Une étude récente utilise la simulation pour créer une chaîne logistique verte (Hui K. et al., 2006). Elle concerne la distribution d'aluminium et compare la pollution due au transport avec différents autres paramètres. Elle est basée sur des conditions idéales et les auteurs soulignent qu'il serait intéressant de rendre le modèle plus réaliste.

Par conséquent, étudier un indicateur $CO_2$ le long d'une chaîne logistique et démontrer le poids qu'il peut avoir paraît pertinent. Pour ce faire, un modèle de chaîne logistique est proposé ici afin d'analyser différents choix de taux de rendement synthétique, de localisations et de produits.

## 3 MODELE CONCEPTUEL DE LA CHAINE LOGISTIQUE

Le modèle proposé consiste en un fournisseur de matière première, une chaîne logistique composée de trois entreprises et d'un client final (figure 1). L'ensemble des entreprises est au même niveau de décisions : il y a partage d'informations. Le fournisseur de matières premières est considéré comme un stock infini. Les commandes du client final suivent une demande externe stochastique.

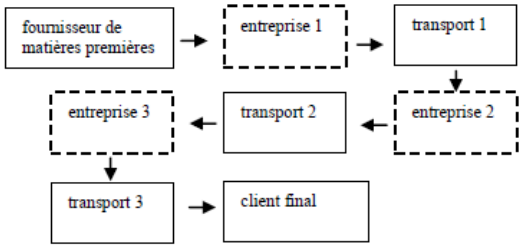



**Figure 1. Modèle de la chaîne logistique**

Chaque entreprise comporte:
- un système de planification et de contrôle qui gère les achats par la stratégie de réponse à la demande et coordonne les flux selon une stratégie Make To Stock (MTS).
- un système physique composé de :
  - un module réception,
  - deux processus en série, transformant les matières premières (MP) en produits semi-finis (PSF) et les PSF en produits finis (PF). Les processus de production sont des lignes de transfert sur lesquelles deux flux de produits sont traités simultanément (figure 2).

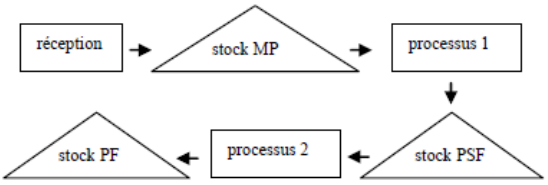



**Figure 2. Modèle de l'entreprise**

Enfin, entre chaque entreprise, un module livraison permet de simuler le transport et les stocks tampons inhérents aux délais de livraison. Ce module est composé de ( figure 3) :
- une ressource transport qui peut être un camion, un bateau ou un avion, selon la distance entre deux entreprises.
- des stocks tampons amont et aval qui sont dimensionnés selon la fréquence et le délai de livraison.

Un collecteur de données $CO_2$ est relié aux trois modules livraison.

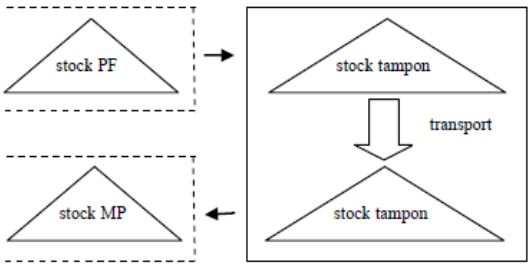



**Figure 3. Modèle du transport**

## 4 BIBLIOTHEQUE DES PARAMETRES DU MODELE

Une bibliothèque de données a été créée pour construire les trois maillons de la chaîne. Des paramètres réels de fabrication sont utilisés pour construire cette bibliothèque de manière réaliste. Dans cet article, les données proviennent de l'entreprise Carrier. Plus généralement, les entreprises on été classées selon trois attributs : taux de rendement synthétique (TRS), localisation et type de produit fabriqué.

### *4.1. Taux de Rendement Synthétique (TRS)*

Le modèle utilise un niveau d'efficience pour classer les systèmes industriels. Le TRS est défini comme suit : TRS = Disponibilité × Performance × Qualité. La Disponibilité est mesurée en temps d'arrêt de production. La Performance est évaluée à partir des pertes de productivité. Enfin, la Qualité est définie en pourcentage de rebuts. Le TRS est un indicateur généralisé, facile à calculer pour les entreprises et offre une évaluation globale du processus de production. De plus, le TRS peut être implémenté facilement comme paramètre de simulation (cadences, pannes, taux de rebuts, temps de réglage). De nombreuses études donnent des niveaux de TRS selon des secteurs industriels variés (Konopka J. and Trybula W., 1996), (Steege P., 1996), (Leachman R. and Hodges D., 1997), (Waterson et al., 1999), (Ahmad and Dhafr, 2002), (Wacker and Sheu, 2006), (Muchiri and Pintelon, 2008). Nous avons donc défini quatre TRS différents : A, B, C et D. Le TRS de chacune est aléatoire selon les simulations mais compris entre 90% et 99% pour une A, 80% et 89% pour une B, 70% et 79% pour une C et entre 60% et 69% pour une D (Miltenburg, 1995).

### *4.2. Localisations et types de produits*

Les produits sont envoyés d'une entreprise à l'autre par bateau, par camion ou par combinaison de ces trois modes de transport. Pour calculer les émissions de $CO_2$, nous devons modéliser la distance entre deux compagnies et estimer le poids et l'encombrement des produits. Les émissions dépendent du poids transporté, du mode de transport utilisé, de la distance parcourue et de l'encombrement de stockage. En effet, l'unité des émissions de $CO_2$ est g ou kg par m² ou tonne.km (ADEME, 2007).

D'abord, la distance entre deux maillons de la chaîne logistique est définie selon quatre possibilités. Le tableau 1 montre ces distances associées à leur délai de livraison. Dans le module livraison, en cas de retard, un mode de transport express en avion est modélisé. Celui-ci est automatiquement choisi si la date de livraison (incluant le transport) n'est pas réalisable. Ici, la simulation à événements discrets est un outil puissant pour calculer de manière dynamique les retards et déclencher des transports express tout en respectant les contraintes de production (réglages, pannes, rebuts, stocks).

| Configuration Notation | Locale l | Régionale r | Continentale c | Globale g |
|---|---|---|---|---|
| Temps de transport en heures | 4 | 8 | 40 | 240 |
| Temps d'attente en heures | 4 | 8 | 20 | 40 |
| Nombre de km | 50 | 500 | 1500 | 8000 |

**Tableau 1. Données du transport**

Ensuite, nous avons ordonné les produits en quatre classes selon les attributs suivants : lourd/léger, encombrant/non encombrant. Les produits seront illustrés par les données de Carrier pour trois d'entre-eux. Le produit encombrant mais léger sera instancié par des données du secteur de la plasturgie. Le tableau 2 montre les données utilisées dans la simulation.

Les hypothèses suivantes ont été retenues pour calculer l'encombrement au sol des produits. Il n'est pas possible d'empiler des produits (3) et (4) donc leur dimension en m² correspond à leur encombrement au sol. Pour les autres produits, des racks de cinq mètres de hauteur sont utilisés. Le nombre de produits stockables sur une telle hauteur est estimé

et nous déterminons ainsi la surface au sol nécessaire pour un produit. Enfin, dans le hangar de stockage, les allées et passages représentent 60% de la surface de stockage.

| produit | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|
| type | thermostat | compresseur | SPA | chiller |
| encombrant | non | Non | oui | oui |
| lourd | non | Oui | non | oui |
| poids en tonnes | 0.0000055 | 0.29 | 0.45 | 8.44 |
| aire totale en m² | 0.000039 | 0.17 | 5.06 | 53.83 |

**Tableau 2. Données des produits**

Le poids des produits et le nombre de kilomètres parcourus entre deux entreprises permettent de calculer les émissions de $CO_2$ dues au fret. L'Agence De l'Environnement Et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) détermine des émissions moyennes par tonne.km à partir d'émissions par véhicule.km et d'une estimation de poids transportés par véhicule. Le tableau 3 indique la valeur des émissions en $gCO_2$ équivalent par tonne.km selon le mode de transport employé. Pour les destinations locale, régionale ou continentale, le mode de transport est le camion ; pour la destination globale le bateau. L'avion sera employé pour les transports continentaux ou globaux express.

Pour le tableau 3, on notera que les camions utilisés pour les destinations locales sont plus petits que pour les destinations régionales ou continentales par conséquent les émissions par tonne.km de $CO_2$ sont plus importantes dans le premier cas. L'ADEME, d'après des données du Ministère de l'Equipement français considère que le taux moyen de remplissage des camions est de 30% de leur charge utile. Pour les transports par avion, le décollage et l'atterrissage sont plus émetteurs de CO2 d'où les émissions par km plus élevées pour les moyens que pour les longs courriers. Les émissions dues au stockage représentent l'empreinte carbone en $kgCO_2$ par m² de la construction d'un hangar de stockage. Toutes ces données proviennent de l'ADEME.

| Transport | $gCO_2$ équivalent par tonne.km (incertitude) |
|---|---|
| Local (l) | 145,10 (10%) |
| Regional (r) ou Continental (c) Global (g) | 74,90 (10%) |
| Produit 1 | 3,57(10%) |
| Produit 2 | 42,86(10%) |
| Produit 3 | 33,33(10%) |
| Produit 4 | 13,64(10%) |
| Express continental | 570 (20%) |
| Express global | 320 (20%) |
| **Stockage** | **par m² (incertitude)** |
| Hangar industriel | 75 000 (50%) |

**Tableau 3. Emissions de $CO_2$**

## 5 MODELE DE SIMULATION ET CALIBRAGE

### *5.1. Configuration de la simulation*

Avant de commencer la simulation, la chaîne logistique a besoin d'être configurée. Ajouter un type d'entreprise revient à choisir dans la bibliothèque : une localisation (l, r, c ou g), un type de produit (1, 2, 3, 4) et un TRS (A, B, C, D). Par conséquent, les trois maillons ont des profils différents. Une fois les informations extraites de la bibliothèque, le modèle est automatiquement formé. Le logiciel de simulation ARENA version 12 est utilisé.

### *5.2. Caractéristiques de la simulation*

La demande finale suit une loi normale de moyenne 50 et d'écart-type 5 avec une fréquence d'arrivée journalière. Elle est directement transformée en ordre de livraison de produits finis qui suit une production sur stock (MTS). Si les produits finis sont en stock, ils sont automatiquement livrés. Sinon, si la date de livraison n'est pas réalisable, une livraison express est ordonnée pour les destinations continentales et globales. Deux stocks tampons sont prévus : l'un dû aux délais de livraison, l'autre dû aux fréquences de livraison.

Les processus de production, de réglage, de changement d'outillage suivent une loi triangulaire. La disponibilité est ajustée via les pannes qui sont modélisées par une fonction exponentielle. Cette dernière représente les temps moyens entre les pannes, les réparations et les réglages. La performance est réglée selon les cadences des machines. Tous ces paramètres sont fixés pour atteindre le taux de TRS requis pour le cas étudié. Après avoir rentré ces variables dans le profil de l'entreprise, les variables de commande comme le point de pénétration de la commande et la taille de lots sont calibrées. Dans notre approche, les stocks sont calibrés pour un taux de service de 100% et des transports express sont modélisés en dernier recours. Dans une précédente étude (Jaegler and Burlat, 2010), ces deux hypothèses étaient différentes : le stockage était moins élevé et les transports plus fréquents.

Cinq simulations de 40 000 heures chacune sont effectuées pour chaque configuration. Les campagnes de simulations sont donc suffisamment nombreuses et longues pour dépasser la phase transitoire du système et tenir compte de la possibilité de phénomènes aléatoires.

## 6 RESULTATS DES SIMULATIONS

### *6.1 Configurations des simulations*

Nous simulons les combinaisons ayant les caractéristiques suivantes pour :

- un TRS homogène : AAA, BBB, CCC, DDD,

soit 4 combinaisons possibles.

- le type de produits : 1, 2, 3, 4 constant tout au long de la chaîne logistique

soit 4 combinaisons possibles

- la localisation dégradée: lll, rll, lrl, llr, cll, lcl, llc, gll, lgl, llg, rrr, crr, rcr, rrc, grr, rgr, rrg, ccc, gcc, cgc, ccg, ggg.

soit 22 combinaisons possibles.

Nous avons considéré les configurations homogènes lll, rrr, ccc et ggg puis introduit un maillon plus éloigné : r, c ou g pour ll, c ou g pour r, g pour c. Ceci constitue les configurations dégradées.

### *6.2 Résultat*

Nous analysons donc 352 configurations au total. Nous nous focalisons dans un premier temps sur 22 configurations à localisation dégradée mais à TRS AAA et de type de produit 1. Nous effectuons une analyse en composantes principales sur les quatre critères suivants: émissions dues au stockage et au transport, nombre de produits stockés, nombre de kilomètres. Les classes sont représentées selon la localisation des trois maillons. Par exemple, lll signifie qu'il y 50 km entre chaque entreprise de la chaîne. Plus les classes sont à droite, plus leurs critères financiers et environnementaux augmentent.

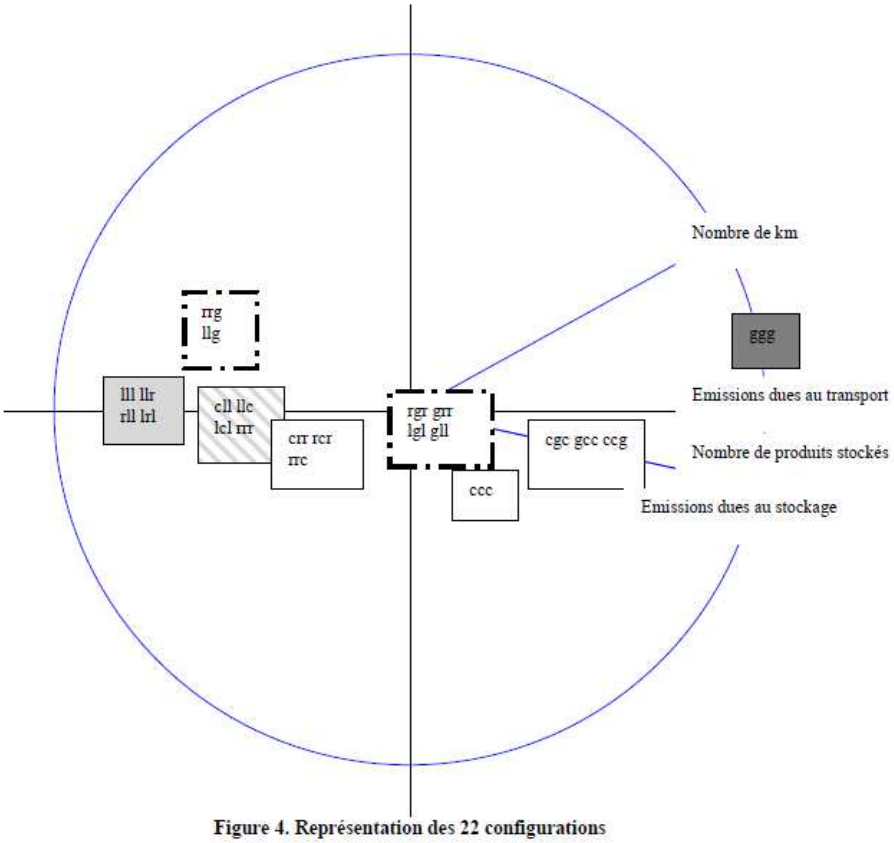



**Figure 4. Représentation des 22 configurations**

Les configurations en lll et ses dégradations (en gris clair) avec une localisation r émettent moins que les autres configurations. La configuration homogène globale (en gris foncé) est celle qui émet le plus.

Par contre, les autres classes méritent des explications car les résultats ne sont pas forcément triviaux. Les configurations dégradées en c de lll sont équivalentes à une configuration entièrement régionale (en hachuré). Si nous nous intéressons à la configuration continentale, nous voyons que dès que celle-ci est dégradée avec une localisation globale le nombre de kilomètres et les émissions augmentent quelle que soit la place de la dégradation de même avec la configuration régionale et ses dégradations avec une configuration continentale.

Les dégradations des configurations locale et régionale avec une configuration globale (en pointillé) apportent une information intéressante : les configurations où la localisation globale est en position finale sont moins émettrices que les configurations où cette localisation est en amont.

Nous réalisons un focus sur ces configurations. Nous avons paramétré notre modèle pour un taux de service de 100%. Les stocks et les niveaux de sécurité de ceux-ci sont paramétrés en conséquence. Lorsque la localisation globale se situe en première ou seconde position, les transports express, plus émetteurs que les transports classiques, se déclenchent pour livrer la dernière entreprise afin que celle-ci puisse livrer à l'heure le client final. Lorsque le client final se situe très loin de la dernière entreprise, il y a peu de transports express puisque les stocks de la dernière entreprise sont paramétrés pour un taux de service de 100%. Les émissions dues au stockage, selon les configurations, sont de 7 à 200 fois moins importantes que celles dues au transport.

Nous reprenons les 22 configurations précédentes en les appliquant aux quatre types de produits soit 88 configurations (figure 5). Si nous effectuons la même classification par analyse des composantes principales, nous constatons que le type de produits est très influent. Les produits 1 et 2 sont dans les mêmes classes quelle que soit la classe. Plus les localisations sont dégradées plus les classes se décalent vers le haut et la droite : les critères financiers augmentent fortement ainsi que les critères environnementaux dans une moindre mesure. Les résultats des émissions des produits 3 et 4 sont très importants (en gris) et prennent le dessus par rapport aux autres facteurs.

Un point est à noter : la présence dans la même classe des produits 1 et 2 en configuration ccc et des produits 3 et 4 (en gris foncé). Nous pouvons expliquer ce point par le nombre de kilomètres parcourus en camion et non en bateau comme dans la configuration ggg. Or le bateau émet du $CO_2$ en quantité moindre par rapport au camion. Le type de produits ne compense pas cette différence. Or, une configuration cgc par exemple avec le produit 1 émettra donc moins en termes d'émissions dues au transport qu'une configuration ccc. En simplifiant, nous aurions 8000 kilomètres multipliés par un facteur d'émissions de 3.57 soit 28 560 contre 1600 kilomètres par 74.90 soit 119 840. Nous avons étudié l'influence des produits dans les résultats des configurations à localisation dégradée. Nous allons à présent étudier l'influence du TRS.

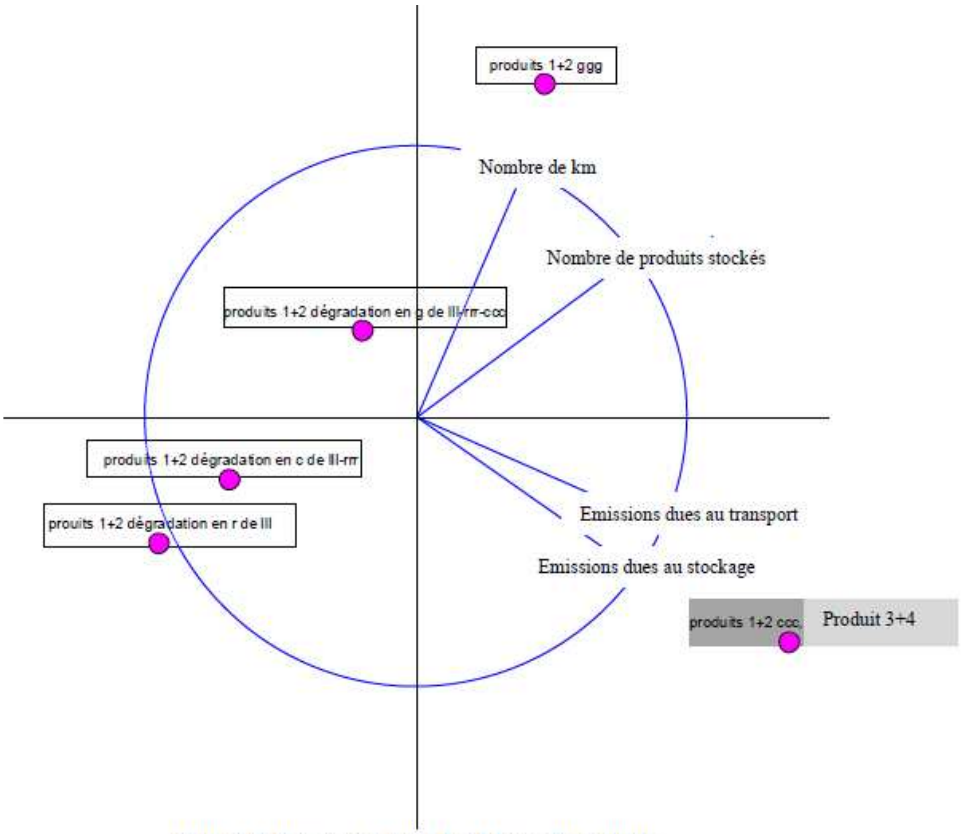



**Figure 5. Représentation des 88 configurations**

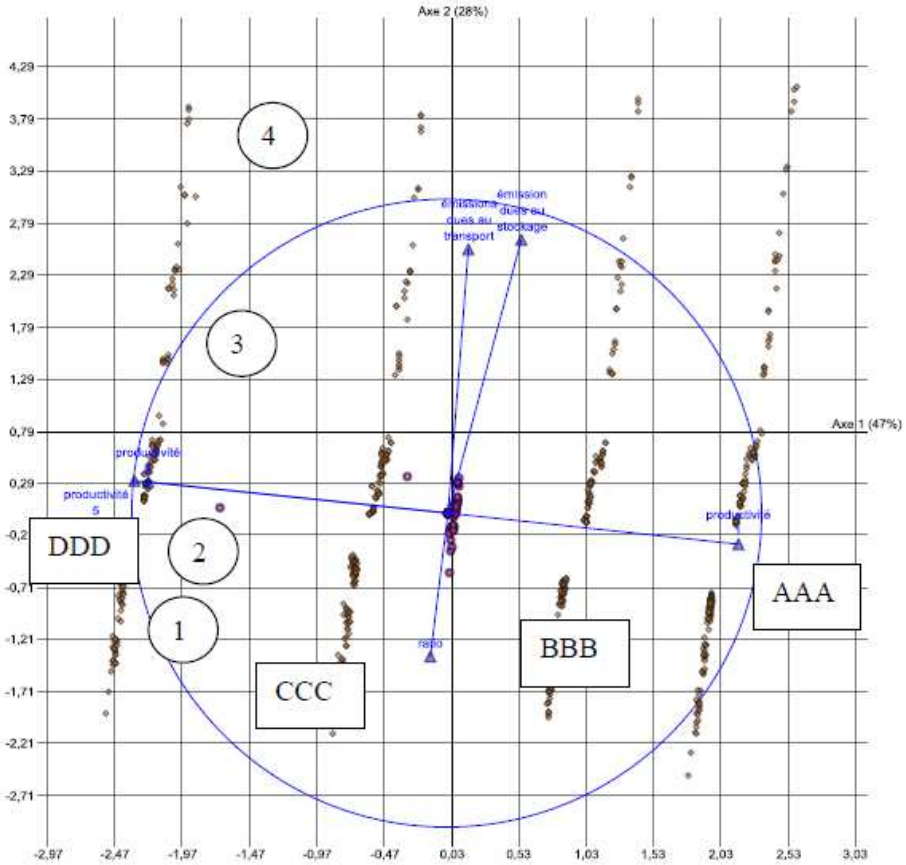



**Figure 6. Répartition des configurations selon les axes 1 et 2**

En effectuant une analyse en composantes principales sur six critères (émissions dues au stockage et au transport, productivité des trois entreprises et ratio nombre de kilomètres sur nombre de produits livrés), nous obtenons deux axes :

| | Premier 1 | Second axe |
|---|---|---|
| % information | 47% | 28% |
| contributions positives | productivité 2+3 | Emissions dues au stock et au transport |
| contributions négatives | productivité 1 | |

**Tableau 5. Contributions aux axes**

La répartition des configurations selon les deux premiers axes est en figure 6 ci-dessus. Nous spécifions la répartition des observations selon les TRS sur le premier axe. Les ordonnées des configurations à TRS différent varient peu ce qui signifie que les émissions sont peu impactées par cette donnée.
Nous positionnons également facilement la répartition des produits. Le produit 4 (avec des ordonnées élevées) est celui qui émet le plus de $CO_2$ suivi du produit 3 (avec des ordonnées moins élevées). Les produits 1 et 2 sont proches avec des ordonnées plus faibles. Ceci est vrai quel que soit le TRS.
Nous nous apercevons que les TRS ont moins d'influence que les types de produits sur les émissions de $CO_2$.

## 7 DISCUSSION ET IMPLICATIONS MANAGERIALES

Les résultats de la simulation mettent en lumière les faits suivants : quand la chaîne logistique est homogène, les émissions de carbone augmentent logiquement. Trois localisations locales émettent mois que trois régionales, qui émettent moins que trois continentales, qui émettent elles-mêmes moins que trois globales. Dans le cas d'une chaîne logistique très hétérogène (avec des localisations globales et locales), plus la localisation globale est en amont de la chaîne, plus la configuration ainsi formée est émettrice de $CO_2$. De manière générale, quand les configurations sont hétérogènes, plus la localisation éloignée est en amont de la chaîne, plus la chaîne logistique émet de CO2 : les configurations llr, llc, llg sont moins émettrices que les configurations lrl, lcl, lgl qui, elles-mêmes, émettent moins que les configurations rll, cll, gll.
De plus, de manière plus logique, le changement de TRS nous indique qu'il vaut mieux choisir un TRS homogène élevée mais que celle-ci au niveau des émissions de carbone a une influence moindre par rapport au type de produits. Cependant à produits égaux, plus le TRS est haut, plus l'impact environnemental sera faible.
Ces résultats fournissent un guide pour les partenaires logistiques dans leur choix de fournisseur pour obtenir une chaîne logistique verte. Un fait qui n'est pas forcément trivial consiste à s'intéresser à la place de celui-ci dans la chaîne logistique. Plus le fournisseur sera placé en amont de la chaîne logistique plus il faudra prêter attention à sa localisation. Même si les derniers maillons sont proches les uns des autres, plus les derniers seront éloignés les uns des autres plus la chaîne logistique émettra de $CO_2$ dans le cadre d'hypothèses prises pour cette étude. En termes écologiques, il est donc ici préférable d'être plus proche du fournisseur de matières premières que du marché final.

## 8 CONCLUSION

Dans cet article, nous avons développé, implémenté et évalué un modèle de chaîne logistique. La simulation est utilisée pour jauger une grande variété de scenarii de chaînes logistiques. Cet outil de simulation a été testé dans le cas d'un environnement de production en Make To Stock pour le flux de quatre produits avec quatre localisations d'entreprises possibles. De manière inattendue, la localisation du premier maillon influence considérablement les résultats de la simulation. Enfin, nous concluons que le type de produits a une très forte influence sur les émissions de $CO_2$ ainsi que la localisation de la première entreprise. Plus l'entreprise est en aval de la chaîne logistique, moins sa localisation est impactante. De même, le TRS est peu influent au regard des autres données d'entrée.
Se pose à présent la question suivante : qu'en est-il de ces résultats si nous dégradons également les TRS? De manière plus générale, quels changements si nous prenons des hypothèses de départ différentes et notamment la variabilité de la demande ?
Nos prochaines recherchent se focaliseront sur cette question. Ainsi, nous simulerons une vue plus complète de la performance écologique de la chaîne logistique.

## 9 REFERENCES


ADEME (2007). Guide des facteurs d'émissionsReport: Mission interministérielle de l'Effet de Serre.

Ahmad, M. M. and Dhafr, N. (2002). "Establishing and improving manufacturing performance measures." Robotics & Computer-Integrated Manufacturing 18(3/4): 171.

Akono, D. and Fernandes, V. (2009). "Impacts du développement durable sur les organisations logistiques. (French)." Revue Management et Avenir(26): 241-255.

Banks J. (1998). Handbook of Simulation : Principles, Methodology, Advances, Applications, and Pratice. New York: John Wiley.

Brent, A. C. and Visser, J. K. (2005). "An environmental performance resource impact indicator for life cycle management in the manufacturing industry." Journal of Cleaner Production 13(6): 557-565.

Carter, C. R. and Rogers, D. S. (2008). "A framework of sustainable supply chain management: moving toward new theory." International Journal of Physical Distribution & Logistics Management 38(5): 360-387.

Chan, F. T. S. (2003). "Interactive selection model for supplier selection process: an analytical hierarchy process approach." International Journal of Production Research 41(15): 3549-3579.

Cholette, S. and Venkat, K. (2009). "The energy and carbon intensity of wine distribution: A study of logistical options for delivering wine to consumers." Journal of Cleaner Production 17(16): 1401-1413.

Handfield, R., Walton, S. V., Sroufe, R. and Melnyk, S. A. (2002). "Applying environmental criteria to supplier assessment: A study in the application of the Analytical Hierarchy Process." European Journal of Operational Research 141(1): 70-87.

Hellström J. and Johnsson M. (2002). "Using discrete-event simulation in supply chain planning." The 14th Annual Conference for Nordic Researchers in Logistics.

Hui K., Spedding T.A., Bainbridge I. and Taplin D.M. (2006). "Creating a green supply chain : a simulation and a modeling

approach." In Springer (ed.), Greening the supply chain by J. Sarkis pp. 341-363). London.
Jaegler, A. and Burlat, P. (2010). "Linking Carbon Performance and Effectiveness of Supply Chain." In L. M. Camarinha-Matos, X. Boucher and H. Afsarmanesh (eds.), PRO-VE, IFIP AICT 336. Saint-Etienne.
Kannan, G., Noorul Haq, A., Sasikumar, P. and Arunachalam, S. (2008). "Analysis and selection of green suppliers using interpretative structural modelling and analytic hierarchy process." International Journal of Management & Decision Making 9(2): 1-1.
Kiernan, M. J. (2001). "Eco-Value, Sustainability, and Shareholder Value: Driving Environmental Performance to the Bottom Line." Environmental Quality Management 10(4): 1-12.
King A. and Lenox M. (2001). "Does it really pay to be green? An empirical study of firm environnmental and financial performance." The Journal of Industrial Ecology.
Klassen R-D and McLaughlin C. (1996). "The impact of environmental management on firm performance." Management Science 42: 1199-1214.
Konopka J. and Trybula W. (1996). "Overall Equipment Effectiveness (OEE) and cost." IEEE/CPMT-Electronics Manufacturing Technology Symposium.
Leachman R. and Hodges D. (1997). Benchmarking Semiconductor ManufacturingReport.
Lu, L. Y. Y., Wu, C. H. and Kuo, T. C. (2007). "Environmental principles applicable to green supplier evaluation by using multi-objective decision analysis." International Journal of Production Research 45: 4317-4331.
Mebratu, D. (1998). "Sustainability and sustainable development : historical and conceptual review." Elsevier Science Inc. .
Miltenburg, J. (1995). Manufacturing strategy. Portland, Oregon: Productivity Press
Muchiri, P. and Pintelon, L. (2008). "Performance measurement using overall equipment effectiveness (OEE): literature review and practical application discussion." International Journal of Production Research 46(13): 3517-3535.
Porter M. E. and Van der Linde C. (1995). "Green and competitive : ending the stalemate." Harvard Business Review 73: 120.
Rao, P. and Holt, D. (2005). "Do green supply chains lead to competitiveness and economic performance?" International Journal of Operations & Production Management 25(9): 898-916.
Rizet, C. and Keïta, B. (2005). "Chaînes logistiques et consommation d'énergie : cas du yaourt et du jean." In Inrets-Dest (ed.).
Saling P., Kicherer A., Dittrich-Krämer B., Wittlinger R., Zombik W., Schmidt I. and al (2002). "Eco-efficience analysis by BASF : the method." The International Journal of Life Cycle Assessment 7(4): 203-218.
Scherpereel, C., van Koppen, C. S. A. and Heering, G. B. F. (2001). "Selecting Environmental Performance Indicators." Greener Management International(33): 97.
Seuring, S. and Müller, M. (2008). "From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management." Journal of Cleaner Production 16(15): 1699-1710.
Siracusa G., L. R. A. D., Sterlini S.E. (2004). "A new methodology to calculate the environnemental protection index. A case study applied to a company producing composite materials." Journal of Environmental Management 73: 275--284.
Soytas, U. and Sari, R. (2009). "Energy consumption, economic growth, and carbon emissions: Challenges faced by an EU candidate member." Ecological Economics 68(6): 1667-1675.
Srivastava, S. K. (2007). "Green supply-chain management: A state-of-the-art literature review." International Journal of Management Reviews 9(1): 53.
Steege P. (1996). " Overall Equipment Effectiveness in Resist Processing Equipment." IEEE/SEMI- Advanced Semiconductor Manufacturing Conference.
Sundarakani, B., de Souza, R., Goh, M., Wagner, S. M. and Manikandan, S. (2010). "Modeling carbon footprints across the supply chain." International Journal of Production Economics In Press, Corrected Proof.
Tsoulfas, G. T. and Pappis, C. P. (2008). "A model for supply chains environmental performance analysis and decision making." Journal of Cleaner Production 16(15): 1647-1657.
Vachon, S. and Mao, Z. (2008). "Linking supply chain strength to sustainable development: a country-level analysis." Journal of Cleaner Production 16(15): 1552-1560.
Wacker, J. G. and Sheu, C. (2006). "Effectiveness of manufacturing planning and control systems on manufacturing competitiveness: evidence from global manufacturing data." International Journal of Production Research 44(5): 1015-1036.
Waterson, P. E., Clegg, C. W., Bolden, R., Pepper, K., Warr, P. B. and Wall, T. D. (1999). "The use and effectiveness of modern manufacturingpractices: a survey of UK industry." International Journal of Production Research 37(10): 2271.
Wyland, B., Buxton, K. and Fuqua, B. (2000). "Simulating the supply chain." IIE Solutions 32(1): 37.

## III.2.2 Article présenté à PRO-VE le 13 octobre 2010

Luis M. Camarinha-Matos
Xavier Boucher Hamideh Afsarmanesh (Eds.)

# Collaborative Networks for a Sustainable World

11th IFIP WG 5.5 Working Conference on
VIRTUAL ENTERPRISES, PRO-VE'10
St. Etienne, France, 11- 13 October 2010
Proceedings

Support for Innovation Processes in Collaborative Networks 95
Heiko Duin, Manuel Fradinho, Marcus Seifert, and Klaus-Dieter Thoben

The Role of Collaborative Networks in Business Model Innovation 103
Joseba Arana, and Eduardo Castellano

Stakeholder Analysis of a Platform and Ecosystem for Open Innovation in SMEs 110
Jan Zibuschka, Uwe Laufs, and Wolf Engelbach

**5. Carbon Efficient Value Networks**

Linking Carbon Performance and Effectiveness of Supply Chains 117
Anicia Jaegler, and Patrick Burlat

Methodology for Carbon Footprint in Forestry - Findings and Ways of Improvement 125
Gabriel Chauvet, Jean-Luc Paris, Olivier Devise, and André Charles

How IS Contribute to the Development of a Sustainable Procurement Policy 133
Oihab Allal-Chérif

Promoting Sustainability Awareness through Energy Engaged Virtual Communities of Construction Stakeholders 142
Yacine Rezgui, Ian E. Wilson, and Haijiang Li

**6. Management of CNs in Humanitarian Organizations - I**

Conceptualising Inventory Prepositioning in the Humanitarian Sector 149
Delia Richardson, Sander de Leeuw, and Iris F.A.Vis

Collaboration Networks Involving Humanitarian Organisations - Particular Problems for a Particular Sector 157
Aurélie Charles, Matthieu Lauras, and Rolando Tomasini

What Really Matters in Locating Shared Humanitarian Stockpiles: Evidence from the WASH Cluster 166
Sander de Leeuw, Laura Rock Kopczak, and Martijn Blansjaar

**7. Management of CNs in Humanitarian Organizations - II**

A Mediation Information System to Help to Coordinate the Response to a Crisis 173
Sébastien Truptil, Frédérick Bénaben, and Hervé Pingaud

Towards a Reference Mission Map for Performance Measurement in 181

# Linking carbon performance and effectiveness of supply chains

Anicia Jaegler[1,2] and Patrick Burlat[1]

[1]Division Manufacturing and Computer Sciences, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 158 cours Fauriel, 42023 Cedex, Saint-Etienne, France.
[2]Idrac Center of Applied Research, IDRAC International School of Management 47 rue Sergent Berthet, CP 607, 69258 Lyon Cedex, France.
lagier-jaegler@emse.fr, anicia.jaegler@idraclyon.com, burlat@emse.fr

**Abstract.** Rendering the supply chain more eco-friendly is an innovative idea progressively adopted by industry. Consequently, our research focuses on the $CO_2$ emissions along the supply chain due to freight energy use and storage. A supply chain approach by using a discrete event model was developed. Our proposed tool is able to model Re Order Point production management policy (ROP) and the main demand response strategy Make To Stock (MTS). In addition, the Overall Equipment Effectiveness indicator (OEE), the location of the firms and their types of products are modeled. This method is applied to mechanical and textile industries. The principle objectives of the study are twofold: develop a supply chain simulation benchmark and conduct pertinent experiments to improve green supply chain.

**Keywords:** simulation, carbon emissions, supply chain.

## 1. Introduction

Companies have been interested in supply chain management since the 1980s because of the benefit when collaborating downstream with suppliers and upstream with customers all along a chain. In 1987, the Bruntland report incorporated the definition of "development that meets the needs of present without compromising the ability of future generations to meet their own needs"[1]. This concept has begun to be adopted among many companies during the last few decades. Moreover, sustainability has become a way in which organizations distance themselves from the pack, with the resulting improvement in environmental and social factors and the advantage of reducing cost or even increasing competitiveness. The comprehensive and efficient design of supply chain still lacks some conceptual tools to understand the complex ties between industrial indicators (mostly inventory and delay) on one side, and the environmental impact of meeting their day to day needs on the other. For instance, Carrier (UTC group), a large cooler manufacturer, currently has dealt with a challenging design problem with some success. In another sector, textile, Zannier Group also looks for methodologies to design green supply chains. Roughly, their main problem is how to select suppliers so as to lessen environmental impact without adversely affecting industrial efficiency.

To address part of these concrete issues, our paper studies how localization of suppliers influences both industrial and environmental performance within a supply

chain. While inspired by these two real life industrial cases, our model encompasses other settings as well. It consists of three manufacturers operating along the same value stream, and addressing a final market. With this, three tier supply chains can be evaluated in term of $CO_2$ emissions. Different scenarios can be generated to compare these emissions. One of the objectives is to determine best practices to balance green performance and supply chain efficiency. To do so, discrete event simulation is used to benchmark supply chains composed of firms with various levels of efficiency, two types of products (depending on weight and bulk) and four different locales. We evaluate their resulting performances in terms of inventory levels, customer service, and $CO_2$ emissions due to storage and transportation.

The remainder of this paper is organized as follows: section 2 presents a brief state of the art on green supply chain modeling and simulation. Section 3 suggests a supply chain model. Section 4 explains the way an enterprise library of standard cases has been built to support the model. Section 5 discusses the configuration and the calibration of the simulator and explains the experimental approach. Section 6 shows the main results. Section 7 goes into further detail on these results and provides some managerial insights. Finally, the conclusion provides some perspectives on possible future research.

## 2. Green supply chain modeling and simulation: state of the art

Increasingly, firms are pushed by their customers, shareholders and governments to adopt environmental measures. In addition, several authors show empirically that environmental and financial performances have a positive relationship [2]. Many papers have also indicated that it is financially beneficial for companies to adopt a green supply chain [3]. In addition, other articles also establish a link between green initiatives and increased competitiveness, but do not always have enough evidence to measure the importance [4].To assess performance, green indicators have been studied [5-7]. Several authors have selected relevant indicators [8]. Examples of indicators and their use in research are given in [9]. They agglomerate them in six groups according to activity in the supply chain. On top of that, an eco-efficiency analysis has been conducted [10]. In their study, the societal weighting factors used indicate that emissions, energy and raw materials consumption are the three principal factors (approximately 20% each). Additionally, air pollution emission accounts for 50% of all emissions. As most are aware, the greenhouse gas $CO_2$ is the measurement of reference. Furthermore, according to the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) the most important problem facing our planet is global warming with the resulting increase of $CO_2$ [11] Based on the aforementioned literature, our research focuses on the $CO_2$ emissions along the supply chain.

One of the results of a survey was that supply chain availability, quality, and lower level of greenhouse gas emission (mostly CO2 emissions) are positively linked [12]. An article based on an analytical hierarchy process (AHP) proposed to evaluate a supply chain of an environmental point of view through a Delphi group of environmental experts [13]. But the AHP seems to have some drawbacks: there is no single hierarchy for most criteria, and human trials may bias the results. Another approach used a model called Interactive Selection Model which systemizes the processing steps before the implementation of AHP [14]. But all these studies rely on

statistical analysis based on collected data. This restricts the cases and requires data of high quality. These limitations motivated us to propose another methodological approach based on a discrete event simulation model.

Simulation methods are gaining more and more importance both in research and industrial practices. Indeed, making it possible to explore policies and operating procedures is one of the greatest advantages of simulation [15]. This ability to evaluate "what if" scenarios with a variety of inputs makes simulation a useful technique for analyzing supply chains [16]. Some authors argue that the increasing popularity of simulation as a tool in supply chain management is due to its excellent capacity to evaluate system variation and interdependencies [17]. This enables a decision-maker to assess changes in part of the supply chain and visualize the impact of those changes on the other parts of the system, and ultimately on the efficiency of the entire supply chain. A recent study used the simulation to create a green supply chain [18]. The study is based on ideal conditions and the authors underlined that it could be interesting to make it more realistic.

Therefore studying a $CO_2$ indicator throughout a supply chain and demonstrating the changes with different management choices seems relevant. With these aims in mind, a data driven supply chain model is proposed here to analyze supply chains which differs by the choice of location of product of the players involved.

## 3. Supply chain conceptual model

The proposed model consists in a raw material supplier, a supply chain composed of three enterprises, and a final customer. The raw material supplier is considered to have an infinite supply of stock. The final customer orders according to a stochastic external demand.

Between each enterprise, a delivery module will simulate transport and buffer storage due to delivery time amongst firms. It is composed of a transportation resource to be chosen and downstream and upstream inventory buffers that will be sized according to the frequency of delivery. A $CO_2$ Data collector is attached to the delivery modules.

Each enterprise is comprised of a Planning and Control System to manage procurements with a reorder point (ROP) rule, and synchronize the flows according to a Make to Stock (MTS) policy. The physical system is made of a reception module and two serial processes, transforming raw material (RM) into semi-finished goods (SFG) and SFG into finished goods (FG). These production processes are transfer lines where two product flows are simultaneously treated.

## 4. Enterprise instance collection

A library of enterprises has been built to provide the three tiers within the supply chain model. A consistent way to construct a realistic library was to utilize real manufacturing data to categorize production systems. In this article, the data came from the two industrial cases: Carrier and Zannier groups. More generally, in the model manufacturers have been classified according to three main attributes: Overall Equipment Effectiveness (OEE), localization and type of product.

### 4.1. Overall equipment effectiveness

An effectiveness level is used in the model as a metric to categorize the manufacturing systems. OEE is defined as follows: OEE = Availability × Performance × Quality. Availability is measured in amount of downtime. Performance is assessed in losses of speed. Finally, Quality is gauged by percentage of defects. The OEE indicator is widespread, easy to calculate for firms and offers a comprehensive evaluation of a production process. Furthermore, OEE can be embodied quite easily within simulation parameters like cadences, breakdowns, scrap rates and set up times. Many studies have provided OEE levels in various industrial sectors [19-20]. The typical world class manufacturing target tends to be approximately 90 % (data of Carrier).

### 4.2. Plant locations and types of products

Shipment of raw materials, parts, and finished goods from one location to the next in a supply chain happens by truck, boat or plane. To calculate the $CO_2$ emissions, we need to model the shipping distance between two companies as well as estimate the weight and bulk of the manufactured product. Transport pollution types and levels are dependent on cargo weight, mode of transportation and distance travelled. Indeed, the unit of the $CO_2$ emissions is calculated in g per m³ or ton•km.

First, the plant locations are defined by four areas representing the distance between two successive echelons of the supply chain: local (50km), regional (500km), continental (1600km) and global (8000km). In the transportation module, in case of delays, a speedy transportation mode is modeled. A standard or express transportation is automatically chosen whether the expected delivery date is attainable (including the transport time). Here, discrete event simulation provides a powerful tool to dynamically calculate the delays and trigger express transports with respect to the manufacturing parameters (set up, breakdowns, scraps items and inventory buffers).

Second, we have categorized products into four types according to the following attributes: heavy/light and bulky/small. Only the two extremes are studied: bulky/heavy and small/light. The others are linear combinations of the other two. Configuration 1 is typical of the mechanical industry, and will be illustrated by data from Carrier. The data of the product 1 are: 8,44 tones and 53,93 m³. Configuration 2 is widespread in the textile industry and will be instanced with data from Zannier group. The data of product 2 are: 0,0002 tones and 0,0005 m³.

For freight energy use, only the weight of the product and the number of kilometers between two firms are used. The French Agency of the Environment and the Energy Mastery (ADEME) provides the figures of $CO_2$ emissions per ton•km. Table 1 indicates the number of $CO_2$ emissions in $gCO_2$ equivalent per ton•km according to the transportation. For the local, regional and continental loci trucks are often used. Worldwide delivery employs container shipping. To explain more fully the figures from table 1 it is important to know that for local transportation, the trucks used are smaller than for the regional or continental shipping so the $CO_2$ emissions are higher per kg.km. When time is of the essence, planes are used and they emit more $CO_2$ during take-offs and landings than during the flight itself. Therefore, emissions per km are significantly higher for medium haul than long haul. The warehouse is considered as an industrial shed.

**Table 1.** $CO_2$ emissions due to the transportation according to the location and

storage (uncertainty)

| Location | $gCO_2$ equivalent per ton•km/ per m³ |
|---|---|
| **Local (l)** | 145,10 (10%) |
| **Regional (r) or Continental (c)** | 74,90 (10%) |
| **Global (g)** | 37,68 (10%) |
| **Express continental air freight** | 570 (20%) |
| **Express global air freight** | 320 (20%) |
| **Industrial shed** | 75 000 (50%) |

## 5. Simulation model and calibration

### 5.1 Configuring simulation

Before the start of the simulation, the supply chain needs to be configured. Adding a manufacturer type to the library entails (i) opting a locale (l, r, c and g), (ii) choosing a type of product (product classes 1 or 2). Therefore, the three tiers may have different profiles. These are picked up from the library. Then, the model is automatically formed. ARENA simulation software is used.

### 5.2 Simulation characteristics

Final customers are modeled with a normal stochastic distribution with an average of 50 units, a standard deviation of 5 at an arrival frequency of once a day. Customer requests are directly transformed into delivery orders at the finished goods, following a Make To Stock policy. If enough finish goods are available, then delivery proceeds from stock. Otherwise, a delay is recorded in the case for local or regional destinations. If the order date is overdue, an express transportation is effectuated in the case for continental or global shipping. A buffer stock due to the delay of transportation is forecasted and another buffer is required for the lead-time between two transportations departures.

Production processes, set up and changeover times have been modeled using stochastic triangular distributions with variability. Availability is adjusted via breakdowns modeled by exponential functions representing mean times among failures and repairs and set up times. Performance is set via machines cadences. All these parameters are fixed to meet effectiveness target values, and correspond to average measures from our case studies. After having set these variables in an enterprise profile, command variables such as replenishment reorder points and batch sizes are calibrated. In our approach, the command variables have been calibrated so that the supply chains always meet the final demand without any delay. This means that extra inventory buffers have been sized to compensate for the distance between firms in the case of regional, continental and global locations. This calibration makes it possible to compare supply chains offering identical customers' performance, and to focus on $CO_2$ emissions.

Twenty simulation runs of 10 000 hours were performed for each configuration. Simulation campaigns are sufficiently numerous and long-term to overcome the

system's transitional phase and seem to take account the possibility of most random phenomena.

## 6. Results of simulation

128 configurations can be simulated because two types of product can be chosen and four locations can be designated. Discrete Mobile Centers method is used to categorize the locations with both transport and storage $CO_2$ emissions. Six classes were obtained (table 2).

**Table 2.** Location according to classes

| | |
|---|---|
| **class 1** | **rgr, grl, glr, cgr, gll, ggr, lgl, grr, ggl, rcl** |
| **class 2** | rrg, gcg, cgg, grg, ggg, glg, lgg, llg, ccg, rgg |
| **class 3** | rcc, crc, clg, ccc, glc, lgc, grc, lcg, crg, rgc, llc, clc, rlc, lcc, lrc, rlg, rrc, rcg, lrg, gcc, cgc, ggc |
| **class 4** | rcr, gcl, cgl, grc, crr, ccl, rgl, lgr, cll, lcl, clr, lcr, crl, ccr |
| **class 5** | rrl, rlr, rrr, llr, rll, lrl, lrr |
| **class 6** | LLl |

Figure 1 shows the distribution of 6 classes. Class 2 has the highest level for emissions due to storage and transportation. We find Xgg, gXg and XXg configuration for product 1. Class 3 presents fewer emissions than Class 2 and is composed of Xcc, cXc. Class 6 has the lowest level for both emissions with the 3 local configurations. Class 5 emits more according to storage than class 6 and is composed of configurations which are combinations of regional and local. The other classes 1, 4 are concentrated and are composed of regional or local in the last tier. If an analysis of product 2 were to be presented the same classification would be found with a decrease of an average of $10^5$. The results of the products 3 and 4 are obtained with linear combinations.

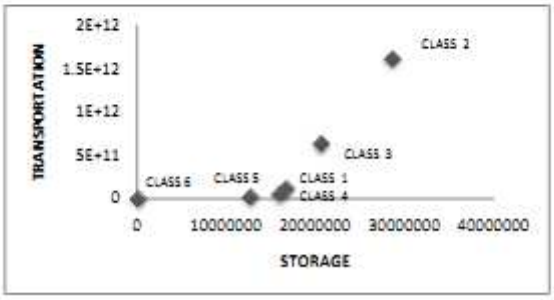



**Fig. 1.** Distribution of classes according to $CO_2$ emissions due to storage and transportation in kg $CO_2$ equivalent

system's transitional phase and seem to take account the possibility of most random phenomena.

## 6. Results of simulation

128 configurations can be simulated because two types of product can be chosen and four locations can be designated. Discrete Mobile Centers method is used to categorize the locations with both transport and storage $CO_2$ emissions. Six classes were obtained (table 2).

**Table 2.** Location according to classes

| | |
|---|---|
| **class 1** | **rgr, grl, glr, cgr, gll, ggr, lgl, grr, ggl, rcl** |
| **class 2** | rrg, gcg, cgg, grg, ggg, glg, lgg, llg, ccg, rgg |
| **class 3** | rcc, crc, clg, ccc, glc, lgc, grc, lcg, crg, rgc, llc, clc, rlc, lcc, lrc, rlg, rrc, rcg, lrg, gcc, cgc, ggc |
| **class 4** | rcr, gcl, cgl, grc, crr, ccl, rgl, lgr, cll, lcl, clr, lcr, crl, ccr |
| **class 5** | rrl, rlr, rrr, llr, rll, lrl, lrr |
| **class 6** | LLl |

Figure 1 shows the distribution of 6 classes. Class 2 has the highest level for emissions due to storage and transportation. We find Xgg, gXg and XXg configuration for product 1. Class 3 presents fewer emissions than Class 2 and is composed of Xcc, cXc. Class 6 has the lowest level for both emissions with the 3 local configurations. Class 5 emits more according to storage than class 6 and is composed of configurations which are combinations of regional and local. The other classes 1, 4 are concentrated and are composed of regional or local in the last tier. If an analysis of product 2 were to be presented the same classification would be found with a decrease of an average of $10^5$. The results of the products 3 and 4 are obtained with linear combinations.

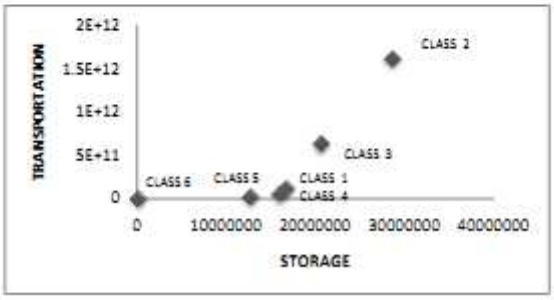



**Fig. 1.** Distribution of classes according to $CO_2$ emissions due to storage and transportation in kg $CO_2$ equivalent

## 7. Discussion and managerial implications

Simulation results highlight the following findings: according to the type of product, the $CO_2$ emissions could increase of a factor of for storage and for transportation. When the supply chain is homogeneous, the $CO_2$ emissions logically increase is in the order of 3 local, 3 regional, 3 continental, 3 global. If the supply chain is very heterogeneous (containing local and global locations), then the green performance degrades as the global locations are located further downstream the supply chain. Indeed, the second and also the last tier have to absorb the delays and so on of the upstream tier. Therefore there is more transportation required at the end of the supply chain as well as more express transportation. Generally, when the arrangement is heterogeneous, the more distant the location is downstream the more their $CO_2$ emissions increase: llr, llc, llg are emitting more $CO_2$ than lrl, lcl, lgl and than rll, cll, gll.

The results provide a basic guide for logistics partner selection helping to choose their supplier to optimize their green supply chain. While not obvious at first glance, it is crucial to pay attention to the position of the farthest link in the chain. Even if the first two locations are quite close, farther the end producer is from the final customer more the emissions increase.

## 8. Conclusion and perspectives

In this paper a supply chain model is developed, implemented and assessed. Simulation is used to evaluate a wide variety of supply chain scenarios. This simulation tool has been tested in the case of a supply chain in a make to stock environment to produce two flows of products with two types of products and with four locations choices (local, regional, continental and global). Types of products affected the $CO_2$ emissions considerably. The effect was linear. Unexpectedly, last tier's locations have significantly influenced simulation results with global locales being the worst choice.

This brings an irksome question: in a green supply chain, would it be better in term of $CO_2$ emissions to have in place a local supplier with poor production management and high stocks, or a global supplier with world class results and lean inventories? Future work may focus on this question by decreasing the OEE performance of some tiers and fine tuning consequently the simulation parameters. A more complete view of the ecological performance of enterprises could be simulated.

## 11. References


1 Bruntland G., http://www.ecoresponsabilite.environnement.gouv.fr. , 05/26/2009

2 King A. & Lenox M., Does it really pay to be green? An empirical study of firm environmental and financial performance. The Journal of Industrial Ecology, vol., pp. (2001).

3 Porter M. E. & Van der Linde C., Green and competitive : ending the stalemate. Harvard Business Review, vol. 73, pp. 120 (1995).

4 Rao P. & Holt D., Do green supply chains lead to competitiveness and economic performance? International Journal of Operations & Production Management, vol. 25 (9), pp. 898-916 (2005).

5 Brent A.C. & Visser J.K., An environmental performance resource impact indicator for life cycle management in the manufacturing industry. Journal of Cleaner Production, vol. 13 (6), pp. 557-565 (2005).
6 Siracusa G., Sterlini S.E., A new methodology to calculate the environnemental protection index. A case study applied to a company producing composite materials. Journal of Environmental Management, vol. 73, pp. 275--284 (2004).
7 Srivastava S.K., Green supply-chain management: A state-of-the-art literature review. International Journal of Management Reviews, vol. 9 (1), pp. 53 (2007).
8 Scherpereel C. et al, Selecting Environmental Performance Indicators. Greener Management International, vol. (33), pp. 97 (2001).
9 Tsoulfas G.T. & Pappis C.P., A model for supply chains environmental performance analysis and decision making. Journal of Cleaner Production, vol. 16 (15), pp. 1647-1657 (2008).
10 Saling P., *et al.* Eco-efficience analysis by BASF : the method. The International Journal of Life Cycle Assessment, vol. 7 (4), pp. 203-218 (2002).
11 Soytas U. & Sari R., Energy consumption, economic growth, and carbon emissions: Challenges faced by an EU candidate member. Ecological Economics, vol. 68 (6), pp. 1667-1675 (2009).
12 Vachon S. & Mao Z., Linking supply chain strength to sustainable development: a country-level analysis. Journal of Cleaner Production, vol. 16 (15), pp. 1552-1560 (2008).
13 Handfield R. et al, Applying environmental criteria to supplier assessment: A study in the application of the Analytical Hierarchy Process. European Journal of Operational Research, vol. 141 (1), pp. 70-87 (2002).
14 Kannan G. et al, Analysis and selection of green suppliers using interpretative structural modelling and analytic hierarchy process. International Journal of Management & Decision Making, vol. 9 (2), pp. 1-1 (2008).
15Banks J., Handbook of Simulation : Principles, Methodology, Advances, Applications, and Pratice (John Wiley, New York) 1998.
16 Hellström J. & Johnsson M., Using discrete-event simulation in supply chain planning. *The 14th Annual Conference for NRL* (2002).
17 Wyland B., Buxton K. & Fuqua B., Simulating the supply chain. IIE Solutions, vol. 32 (1), pp. 37 (2000).
18 Hui K., Spedding T.A., Bainbridge I., & Taplin D.M., Creating a green supply chain : a simulation and a modeling approach. *Greening the supply chain by J. Sarkis*, ed SpringerLondon), pp 341-363, (2006).
19 Ahmad M.M. & Dhafr N., Establishing and improving manufacturing performance measures. Robotics & Computer-Integrated Manufacturing, vol. 18, pp. 171 (2002).
20 Muchiri P. & Pintelon L., Performance measurement using overall equipment effectiveness (OEE): literature review and practical application discussion. International Journal of Production Research, vol. 46 (13), pp. 3517-3535 (2008).

## III.2.3Article présenté au colloque IJPE le 3 mars 2010

Elsevier Editorial System(tm) for International Journal of Production Economics
Manuscript Draft

Manuscript Number:

Title: Green Supply Chains: a Simulation Based Carbon Analysis

Article Type: Special Issue: Innsbruck 2010

Keywords: green supply chain; carbon emissions; inventory; simulation

Corresponding Author: Mrs anicia jaegler,

Corresponding Author's Institution:

First Author: anicia jaegler

Order of Authors: anicia jaegler; patrick burlat, Professor

Abstract: Our research focuses on CO2 emissions along supply chains, from freight energy use to inventories storage. A supply chain model using a discrete event simulation was developed specifically for Carrier, a large manufacturer and distributor of heating, ventilating and air conditioning systems. Our model is able to simulate a two tiers supply chain. Four tunable variables are provided: manufacturing capability, locations, mode of transportation and types of products. Their purpose is to compare levels of CO2 emitted during simulations for differing configurations of different scenarios. The principal objectives of this study are twofold: providing a realistic tool for simulating and promoting greener supply chains, helping managers to select eco-friendly roadmaps.

# Green Supply Chains: a Simulation Based on Carbon Analysis

**Anicia Jaegler*[1], Patrick Burlat[2]**

[1]Idrac Center of Applied Research, IDRAC International School of Management

Heron Building, 28 rue René Cassin, 69009 Lyon, France.

anicia.jaegler@idraclyon.com

[1,2]Division Manufacturing and Computer Sciences, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne

158 cours Fauriel, 42023 Cedex, Saint-Etienne, France.

lagier-jaegler@emse.fr,burlat@emse.fr

**Abstract:**

**Our research focuses on emissions of $CO_2$ along supply chains, from freight energy use and inventories storage. A supply chain model using a discrete event simulation was developed specifically for Carrier, a United Technologies Company. It is able to model a two tiers supply chain. Four tunable variables are provided in the simulation: manufacturing capability, locations, mode of transportation and types of products. Their purpose is to compare levels of $CO_2$ emitted during simulations for differing configurations of different scenarios. The principal objectives of the study are twofold: providing a realistic tool for simulating green supply chains, and a decision help tool.**

Keywords: carbon emissions, green supply chain, simulation

## 1. Introduction

At the outset, in 1995, IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) report led to the Kyoto protocol. Commitments of the Protocol called for reduction of greenhouse gas emissions. In 2007, new IPCC report concludes that the increase of these gases is anthropogenic with a confidence level of 90%.

Industry, as well as other human activities, is involved. Moreover, sustainability has become a way in which organizations can distance themselves from the pack, with a resulting improvement in environmental and social factors and having the advantage of reducing cost or even increasing competitiveness. Nevertheless, the comprehensive and efficient design of supply chain still lacks some conceptual tools to understand the complex ties between industrial indicators (mostly inventory and delay) on one side, and the environmental impacts of meeting their day to day needs on the other.

For instance, Carrier, one of the world's largest manufacturers and distributors of heating, ventilating and air conditioning systems, currently has dealt with the challenging design problem of changing their products in such a way to reduce pollution and increase energy efficiency with some success. In 2003, the American Agency for Environmental Protection recognized it as leader in environmental protection. They have continually produced innovative products while working on diminishing water and energy consumption.

A current way of progress for Carrier is to adopt a green supply chain. Therefore, our paper studies how localization of suppliers influences both industrial and environmental performance within a supply chain. Our model consists of two manufacturers operating along the same value stream, and addressing a final market. Different scenarios can be generated to compare the emissions of the two players. One of the objectives is to determine best practices to balance green performance with supply chain efficiency. To do so, discrete event simulation is used to benchmark supply chains composed of firms with four levels of efficiency, two types of products and four different locales.

The remainder of this paper is organized as follows: section 2 presents a brief state of the art which explains our research's choices. Section 3 suggests a supply chain model. Section 4 proposes the library of parameters which supports the model. Section 5 discusses the configuration and the calibration of the simulator and explains the experimental approach. Section 6 shows study case's results. Finally, the conclusion provides some perspectives on possible future research.

## 1. State of the Art

Due to stricter regulations, pushed by their shareholders and consumers, manufacturers have to integrate environmental concerns into their regular practices [1]. Moreover, several authors have established a positive link between adopting a green supply chain, increasing competitiveness and financial performances [2], [3], [4]. Indeed, Ciliberti et al. show that 50% of the industrial added value is now derived from the supply chain [5]. In addition, Seuring et al. as Vachon and Klassen indicate that firms can be held responsible for the environmental performance of its suppliers or partners [6], [7].

To assess performance, indicators need to be selected. Kainuma and Tawara use three attributes to evaluate a lean and green supply chain: supply chain return on asset (ROA), customer satisfaction and Life Cycle Assessment (LCA) [8]. There are financial, customer

and environmental points of view. The first two are more commonly studied in literature [9-10]. The study of the environmental attribute is newer with discharges of water, air emissions, solid wastes, toxic wastes, local nuisance, energy consumption, water consumption, raw materials and packaging use, investments for environment as examples [11]. An eco-efficiency analysis has been conducted [12]. In their study, the societal weighting factors used indicate that energy use, raw material consumption, and emissions are the three principal factors (approximately 20% each). It should be emphasized that air pollution emission accounts for 50% of all emissions. Currently, the greenhouse gas $CO_2$ is the measurement of reference. Based on its present widespread use, our research uses this environmental index.

Most studies are based on statistical analysis based on collected data [13]. These methods require data of high quality and prevent the design of scenarios which differ from set norms. These limitations goaded us to choose another methodological approach: a discrete-event simulation model. Banks indicates that one advantage of this method is to investigate different configurations [14]. Hellström and Johnsson add that its capability to create “what if” scenarios makes it a very powerful tool to analyze supply chains [15]. Discrete-event simulation allows the user to change the settings one by one to assess their impact and to measure the efficiency of the supply chain. A recent case study of distribution of aluminum metal used the simulation to generate a green supply chain [16]. This was based on ideal conditions and the authors emphasize one perspective for further research could be a more realistic model.

Therefore studying a green supply chain through three indicators chosen: financial, customer satisfaction and environmental as well as demonstrating the changes of alternative management choices seems particularly relevant. With these aims in mind, a data driven supply chain model is proposed to analyze supply chains which differs by the efficiency of the players involved, location, and type of product.

## 1. Supply Chain Conceptual Model

This section begins with a brief visual representation of the supply chain. Figure 1 shows the simulation model of supply chain. It is composed of a material supplier, a supply chain composed of two enterprises, and a final customer. The raw material supplier is considered to have an infinite supply of stock. The final customer orders according to a stochastic external demand.

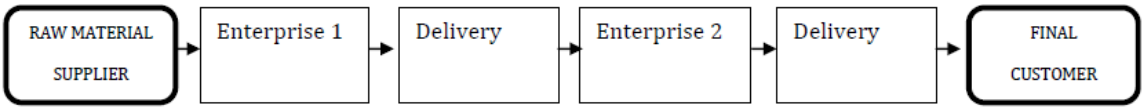



Figure 1. Supply chain conceptual model

Between each enterprise, a delivery module will simulate four different types of transportation: rail, air, water and road. Additionally, two types of buffer storage are created (figure 2): one due to delivery time amongst firms and one for downstream and upstream inventory buffers that will be sized according to the frequency of delivery. Finally, a $CO_2$ data collector is attached to all delivery modules.

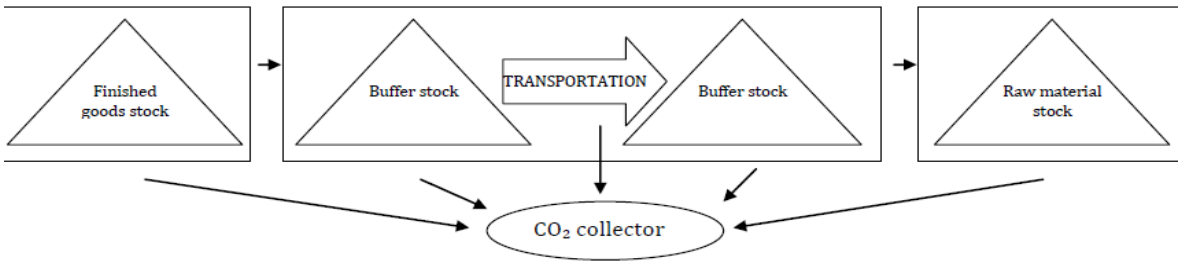



Figure 2. Illustration of the aspects of a delivery module

Each enterprise is comprised of a reception module and two serial processes, transforming raw material (RM) into semi-finished goods (SFG) and SFG into finished goods (FG) as illustrated in figure 3. These production processes are transfer lines where two product flows are simultaneously treated. They are managed with a reorder point (ROP) rule, and synchronized according to a Make to Stock (MTS) policy.

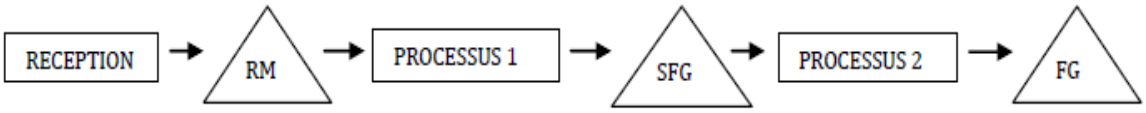



Figure 3. Enterprise module

## 1. Enterprise Library

A library of enterprises has been built to provide instances for the four tiers within the supply chain model (two manufacturers and two transportations). The manufacturers have been classified according to four main attributes: Overall Equipment Effectiveness (OEE), location, transportation, and type of product.

## 1.1 Overall Equipment Effectiveness

An effectiveness level is used in the model as a metric to categorize the manufacturing systems. OEE is defined as follows: OEE = Availability × Performance × Quality. Availability is measured in amount of downtime. Performance is assessed in losses of speed. Finally, Quality is gauged by percentage of defects. The OEE indicator is widespread, easy to calculate for firms and offers a comprehensive evaluation of a production process. In the model, OEE is used to calibrate cadences, breakdowns, scrap rates and set up times. This enables to find tune the size of inventories according to the characteristics of production resources so as meet a given customer service rate.

Many studies have cataloged OEE levels in various industrial sectors [17-22]. Benchmarks report that the usual OEE ranges anywhere from 45% to 90% in mechanical industry. The typical world class manufacturing target tends to be approximately 90 %. For the Carrier data firms have this OEE. So, in the simulation bench, we calibrated the characteristics of the resources to obtain an OEE of 90%, and we tuned the inventories to get a nearly 100% service rate.

## 4.2 Plant Locations and Types of Products

Shipment of raw materials, parts, and finished goods from one location to the next in a supply chain happens by train, truck, boat or plane or some combination therein. To calculate the $CO_2$ emissions, we need to model the shipping distance between two companies as well as estimate the weight and bulk of the manufactured product. Transport pollution types and levels are dependent on cargo weight, mode of transportation and distance travelled. Indeed, the unit of the $CO_2$ emissions is calculated in g or kg per m² or ton-km. Moreover, for the transportation by boat, we need the bulk density in ton/m$^3$.

Initially plant locations are defined by four areas representing the distance between two successive echelons of the supply chain. Table 1 shows these distances with associated delivery times. In the transportation module, in the case of delays, a speedy transportation mode is simulated for continental and global configurations. Either a standard or express transportation is automatically chosen whether the expected delivery date is attainable (including the transport time). Here, discrete event simulation provides a powerful tool to dynamically calculate the delays and trigger express transports with respect to the manufacturing parameters (set up, breakdowns, scraps items and inventory buffers).

| localization | local | regional | | | continental | | | global | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| average distance in km | 50 | 500 | | | 1600 | | | 8000 | |
| type of transportation | truck | truck | train | boat | truck | train | plane | boat | plane |
| time for delivery | | | | | | | | | |
| in hours | 5 | 24 | 5 | 96 | | 24 | 24 | | 24 |
| in weeks | | | | | 1 | | | 6 | |
| buffer storage | | | | | | | | | |
| in hours | 5 | 24 | 5 | 96 | | 24 | 24 | | 24 |
| in weeks | | | | | 1 | | | 6 | |
| time for express transport | N/A | | | | | | 24 | | 24 |
| departure frequency | | | | | | | | | |
| each ... hours | 12 | 24 | 24 | | | | 24 | | 24 |
| each….week | | | | 0.33 | 0.5 | 0.5 | | 1 | |
| buffer storage | | | | | | | | | |
| in hours | 3.5 | 7 | 7 | | | | 7 | | 7 |
| in weeks | | | | 0.33 | 0.5 | 0.5 | | 1 | |

Table 1. Location specifications

Second, products have been categorized into four types according to the following attributes: heavy/light and bulky/small. To reflect existing market conditions for Carrier only two are studied: small/heavy and small/light. Configuration 1 is typical of the mechanical industry and Configuration 2 is widespread in the electronic industry. Both were instanced with actual data from Carrier.

Table 2 shows the data used in the simulations. The following hypotheses have been defined to calculate product ground clutter. Five meters high storage racks are used. How many products can be stacked at this height are estimated to determine rack shelf surface area needed for one product. In the warehouse, aisles and passages represent 60% of the total. The density is necessary to calculate the emissions of the container ship.

| Sector | mechanical sector | electronic sector |
|---|---|---|
| Reference | reman compressor | thermostat |
| Weight in ton | 0.288 | 0.000248 |
| Lenght in meters | 0.84 | 0.07 |
| Width in meters | 0.64 | 0.07 |
| Height in meters | 0.64 | 0.11 |
| Total area in m² for the storage of one product | 0.1720 | 0.0003 |
| density (ton/m$^3$) | 0.84 | 0.46 |

Table 2. Product data

For freight energy use, only the weight of the product and the number of kilometers between two firms are used. The French Agency of the Environment and the Energy Mastery (ADEME) provides the figures of $CO_2$ emissions per ton-km. They determine an average emission per ton-km from an emission per vehicle.km as well as estimate an average weight of goods transported by vehicle. Table 3 indicates the amount of $CO_2$ emissions in $gCO_2$ equivalent per ton-km according to the transportation. This process takes into account upstream emissions and combustion gases. For the local locus trucks are often used; for regional or continental loci truck, train or boat are used. Worldwide delivery employs container shipping. Urgent shipping requires trucking for short routes and air freight for long distances. As aforementioned, in the model, if these are delays, then express transportation is automatically selected.

| location | $gCO_2$ equivalent per ton-km according to | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | truck | train | plane | riverboat | Container ship (2500TEU) |
| Local (l) | 142 (1,5 to 2t) | 22 | | | |
| Régional (r) | 74,90 (>21t) | 22 | | | |
| Continental (c) | 74,90 (>21t) | 22 | | 37.4 | |
| Global (g) | | | | | 3 /density |
| Express continental air freight | | | 1683 | | |
| Express global air freight | | | 601,3 | | |
| with a level of uncertainty using 10% | | | | | |

Table 3. g equivalent $CO_2$ due to the transportation according to the location

To explain more fully the figures from table 3 it is important to know that for local transportation, the trucks used are smaller than for regional or continental shipping so the $CO_2$ emissions are higher per kg.km. When time is of the essence, planes are used and they emit more $CO_2$ during take-offs and landings than during the flight itself. Therefore, emissions per km are significantly higher for medium haul than long haul.

Table 4 represents the carbon footprint of construction in terms of kg $CO_2$ equivalent per m². The warehouse is considered as an industrial shed. All these data comes from ADEME (French Agency of the Environment and the Energy Mastery).

| Storage | $CO_2$ emissions |
|---|---|
| Industrial shed | 75 |

Table 4. $CO_2$ emissions in kg $CO_2$ equivalent per m²

# 1. Simulation Model and Calibration

## 5.1 Configuring Simulation Choice

Before the start of the simulation, the supply chain needs to be configured. Selecting a manufacturer type from the library entails (i) opting a locale (l, r, c and g), (ii) choosing a mode of transportation (boat, train, truck), (iii) selecting a type of product (product classes 1 or 2). ARENA simulation software is used.

## 5.2 Simulation Characteristics

Final customers are modeled with a normal stochastic distribution with average of 50 units, a standard deviation of 5 at an arrival frequency of once a day. Customer requests are directly transformed into delivery orders at the finished goods, following a Make To Stock policy. If enough finish goods are available, then delivery proceeds from stock. Otherwise, a delay is recorded for local or regional destinations. If the order date is overdue, an express transportation is effectuated for continental or global shipping. A buffer stock due to the delay of transportation is forecasted and another buffer is required for the lead-time between two transportation departures.

Production processes, set ups and changeover times have been modeled using stochastic triangular distributions with variability. Availability is adjusted via breakdowns modeled by exponential functions representing mean times among failures and repairs and set up times. Performance is set via machines cadences. All these parameters are fixed to meet target values for effectiveness, and correspond to average measures from our case studies. After having set these variables in an enterprise profile, command variables such as replenishment reorder points and batch sizes are calibrated. In our approach, the command variables have been calibrated so that the supply chains always meet the final demand without any delay. This means that extra inventory buffers have been sized to compensate for the distance between firms in the case of regional, continental and global locations. This calibration makes it possible to compare supply chains offering identical customers' performance, and to focus on $CO_2$ emissions.

Twenty simulation runs of 10 000 hours were performed for each configuration. Simulation campaigns are sufficiently numerous and long-term to overcome the system's transitional phase and seem to take account the possibility of most random phenomena.

## 1. Study Case

Figures 4 and 5 show the roadmap of each product. The locale configuration of the case is global-global. The simulation calculates the $CO_2$ emissions due to the existing configuration. The configuration of locales is immovable. So, we will try to modify not the emplacement but the mode of transportation. The aim of the study is to find an overall greener configuration.

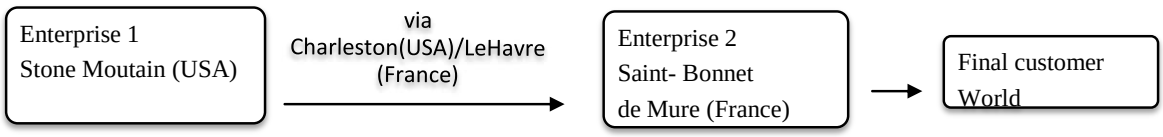



Figure 1. Current roadmap of product 1

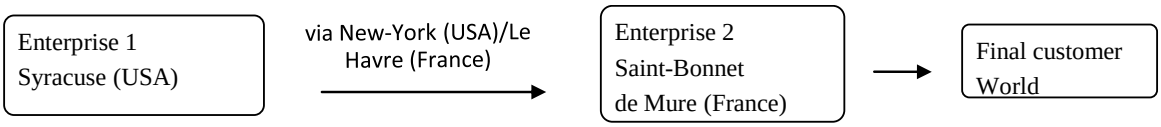


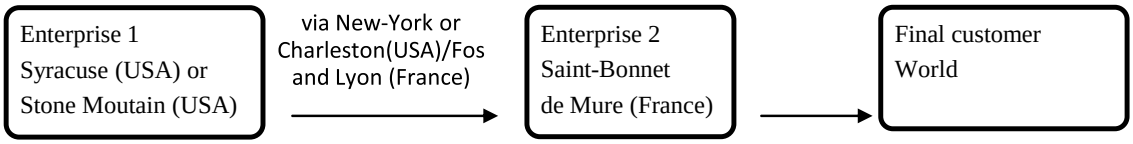

Figure 2. Current roadmap of product 2

From enterprise 1 to enterprise 2 the mode of transportation is truck, boat and truck. Then, finished goods are delivered by boat from enterprise 2 to final global market. We use our model to calculate gas emissions within the current roadmaps. The results are the following (table 5):

| Product number | 1 | 2 |
|---|---|---|
| Gas emissions due to transportation | 5.46E+06 | 4.72E+03 |
| Gas emissions due to storage | 6.55E+01 | 9.57E-02 |
| Total | 5.46E+06 | 4.72E+03 |

Table 5. Results in ton $CO_2$ equivalent for 45 000 Products

Then, we look for a new roadmap with the aim to reduce gas emissions. A greener configuration could be (figure 6):



In this case, the boat doesn't dock at Le Havre (France) but Fos (France). The truck is replaced by a boat along the Rhône. This new configuration has for results (table 6):

| Product number | 1 | 2 |
|---|---|---|
| Gas emissions due to transportation | 5.24E+06 | 4.55E+03 |
| Gas emissions due to storage | 6.89E+01 | 1.01E-01 |
| Total | 5.24E+06 | 4.55E+03 |

Table 6. Results in ton $CO_2$ equivalent for 45 000 products

This new roadmap generates a total decrease of an average of 4%. This decrease is mostly due to a reduction of transport emissions. Storage emissions are slightly higher (+ 3%) with the new roadmap. This is due to larger buffer stocks to compensate a longer lead time because of boat travel along the Rhône instead of truck. Here, simulation has been helpful to design buffer sizes with the aim to keep a constant service rate for final customer.

To go further, the study is now conducted for a total of 25 products. We calculate the difference of gas emissions between the two roadmaps in percentage. If, the percentage is negative, the new roadmap emits less than the current roadmap. If it is positive, it emits more. We observe the following results (Figure 7):

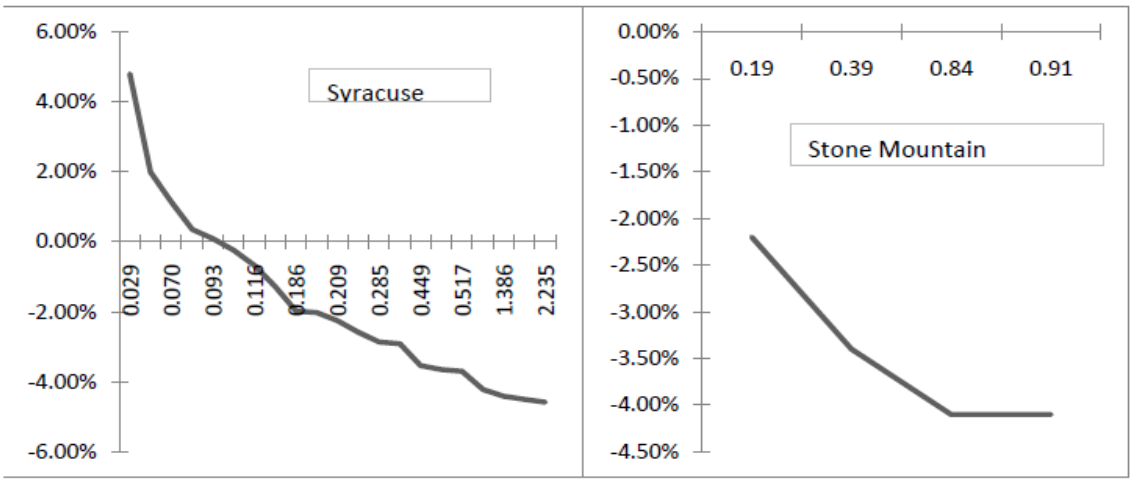



Figure 7. Percentage of difference of emissions according to product density in ton/m$^3$

According to figure 7, the benefit of the new roadmap depends on the density of products. In some cases (low density products), keeping the current roadmap is greener. Here, the use of a boat did not compensate for additional kilometers due to the change of port. Finally, within

Carrier supply chain, the new roadmap is greener only for products with a density higher than 0.1 ton/$m^3$.

## 1. Conclusion and Perspectives

A supply chain model was developed, implemented and assessed. This simulation supply chain tool has been tested based on actual data from an enterprise in a Make To Stock environment to produce two product flows. Interestingly, density of products affected the environmental benefits of alternative roadmaps. Unexpectedly, “greener supposed” roadmaps sometimes emit more than the existing roadmaps. The simulation approach seems to have promise as an effective decision aid for management. This partner firm wished to assess scenarios to reduce its ecological footprint and the simulation appeared to do just that. In addition, the scenarios generated show that for products, which have a density lesser than 0.1 ton/$m^3$, another roadmap need to be explored in future research.

This raises an important question: in term of $CO_2$ emissions, in which case would it be interesting to change only the mode of transport? Moreover, when do we need to change the locales? Future work will focus on these questions. For a more comprehensive analyze of the ecological performance of enterprises, others indicators such as financial and customer points of view will also be included in the simulation.

## 2. Acknowledgments

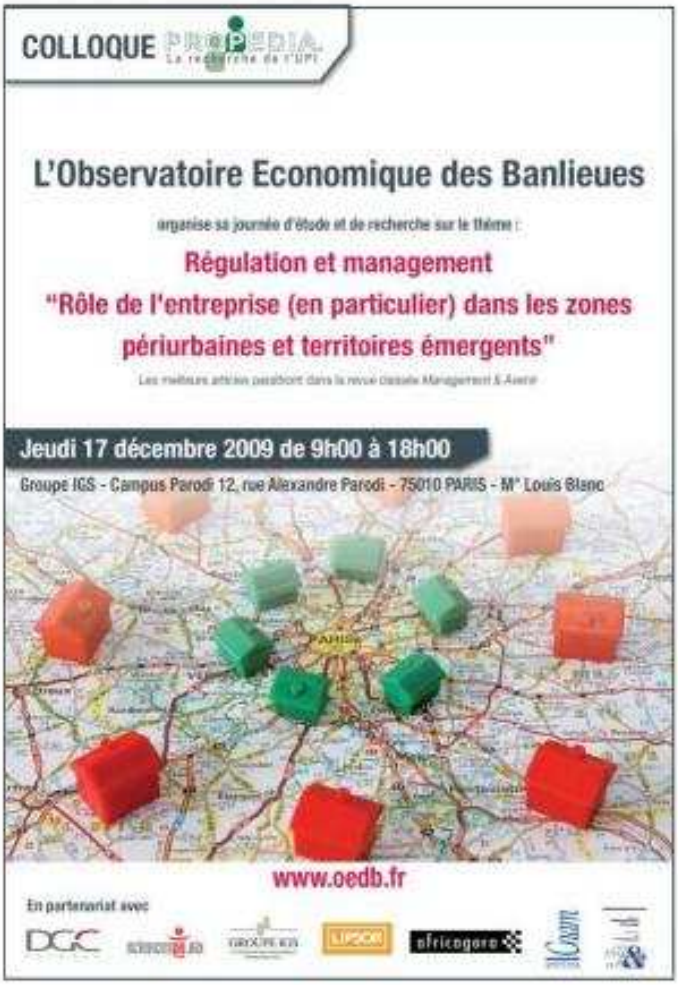
The authors wish to thank Chris Yukna for the helping in English, Fabienne Coruble and Alexandra N’Biene for their help with the data from Carrier.

## 3. References

1. Zhu Q, Sarkis J, & Lai K-h 2008. Confirmation of a measurement model for green supply chain management practices implementation. International Journal of Production Economics, 111 (2),261-273.
2. Porter M. E. & Van der Linde C. 1995. Green and competitive : ending the stalemate. Harvard Business Review, 73,120.
3. King A. & Lenox M. 2001. Does it really pay to be green? An empirical study of firm environnmental and financial performance. The Journal of Industrial Ecology.
4. Klassen R-D & McLaughlin C. 1996. The impact of environmental management on firm performance. Management Science, 42,1199-1214.

1. Zhu Q, Sarkis J, & Lai K-h 2008. Confirmation of a measurement model for green supply chain management practices implementation. International Journal of Production Economics, 111 (2),261-273.
2. Porter M. E. & Van der Linde C. 1995. Green and competitive : ending the stalemate. Harvard Business Review, 73,120.
3. King A. & Lenox M. 2001. Does it really pay to be green? An empirical study of firm environnmental and financial performance. The Journal of Industrial Ecology.
4. Klassen R-D & McLaughlin C. 1996. The impact of environmental management on firm performance. Management Science, 42,1199-1214.
5. Ciliberti F, Pontrandolfo P, & Scozzi B 2008. Logistics social responsibility: Standard adoption and practices in Italian companies. International Journal of Production Economics, 113 (1),88-106.
6. Seuring S, Sarkis J, Müller M, & Rao P (Sustainability and supply chain management – An introduction to the special issue. Journal of Cleaner Production, pp 1545-1551.
7. Vachon S. & Klassen R-D 2006. Extending Green Supply practices accross the supply chain : the impact of upstream and downstrean integration. The International Journal of Production Economics, 26 (7),795-821.
8. Kainuma Y & Tawara N 2006. A multiple attribute utility theory approach to lean and green supply chain management. International Journal of Production Economics, 101 (1),99-108.
9. Gunasekaran A, Patel C, & McGaughey RE 2004. A framework for supply chain performance measurement. International Journal of Production Economics, 87 (3),333.
10. Scherpereel C, van Koppen CSA, & Heering GBF 2001. Selecting Environmental Performance Indicators. Greener Management International, (33),97.
11. Brent AC & Visser JK 2005. An environmental performance resource impact indicator for life cycle management in the manufacturing industry. Journal of Cleaner Production, 13 (6),557-565.
12. Saling P., et al. 2002. Eco-efficience analysis by BASF : the method. The International Journal of Life Cycle Assessment, 7 (4),203-218.
13. Vachon S & Mao Z 2008. Linking supply chain strength to sustainable development: a country-level analysis. Journal of Cleaner Production, 16 (15),1552-1560.
14. Banks J. 1998. Handbook of Simulation : Principles, Methodology, Advances, Applications, and Pratice (John Wiley, New York).
15. Hellström J. & Johnsson M. 2002. Using discrete-event simulation in supply chain planning. The 14th Annual Conference for Nordic Researchers in Logistics.
16. Hui K., Spedding T.A., Bainbridge I., & Taplin D.M. 2006. Creating a green supply chain : a simulation and a modeling approach. Greening the supply chain by J. Sarkis, ed SpringerLondon), pp 341-363.
17. Ahmad MM & Dhafr N 2002. Establishing and improving manufacturing performance measures. Robotics & Computer-Integrated Manufacturing, 18 (3/4),171.
18. Leachman R. & Hodges D. (1997) Benchmarking Semiconductor Manufacturing. in IEEE/IRW Final report. .
19. Muchiri P & Pintelon L 2008. Performance measurement using overall equipment effectiveness (OEE): literature review and practical application discussion. International Journal of Production Research, 46 (13),3517-3535.
20. Steege P. 1996. Overall Equipment Effectiveness in Resist Processing Equipment. IEEE/SEMI- Advanced Semiconductor Manufacturing Conference.
21. Wacker JG & Sheu C 2006. Effectiveness of manufacturing planning and control systems on manufacturing competitiveness: evidence from global manufacturing data. International Journal of Production Research, 44 (5),1015-1036.

## III.2.4 Article présenté au colloque PROPEDIA le 17 décembre 2009




***Atelier 2 : Territoire et régulation*** ***Salle 218***
*Président : Luc BOYER, PROPEDIA, CNAM/LIPSOR*
*Animateur: Ali SMIDA, professeur, CR2SM, PROPEDIA*

- Nora BOUAMARI, (IDRAC), « Noirs et territoires aux Etats-Unis. »
- Jean-Yves HAMIOT, Karine MERLE, (IDRAC) « Quelle relation d'emploi dans les zones périurbaines et territoires émergents? Les apports et limites du concept de contrat psychologique. »
- Patrick DAMBRON (PROPEDIA) et Claudie ORIAN, « La démarche convergente de "place marketing" et de marketing territorial, vecteur de dynamique urbaine et périurbaine cohésive. »
- Samuel MAYOL, Olivier MEIER et Michel BARABEL (IDRAC), « Le rôle des média-sociaux dans la dynamisation de la culture de territoire »
- Anicia JAEGER et Patrick BURLAT, (IDRAC), « Quel est et quel sera l'impact du développement durable sur la relocalisation des entreprises industrielles en zones périurbaines. »
- Yvon PESQUEUX, Professeur, CNAM/LIPSOR, « Territoires, clusters et parties-prenantes. »

# Quel est et quel sera l'impact du développement durable sur la relocalisation des entreprises industrielles en zones périurbaines ?
# What is and will be the impact of sustainable development on the re-localization of manufacturing enterprises in suburban areas?

**Anicia Jaegler et Patrick Burlat**
Centre Génie industriel et informatique, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 158 cours Fauriel, 42023 Cedex, Saint-Etienne, France.
ICAR (Idrac Center of Applied Research), IDRAC Ecole Supérieure de Commerce, 47 rue Sergent Berthet, CP 607, 69258 Lyon Cedex, France.
lagier-jaegler@emse.fr, anicia.jaegler@idraclyon.com, burlat@emse.fr

## Résumé
Pour choisir leurs fournisseurs, les entreprises sont, de plus en plus, poussées à analyser des indicateurs verts. Notre recherche s'intéresse donc aux émissions de CO2 dues au transport et au stockage le long de la chaîne logistique. Pour ce faire, nous avons développé un modèle utilisant la simulation à événements discrets. L'outil proposé modélise une stratégie de réponse à la demande et coordonne les flux en Make To Stock. La performance industrielle est prise en compte avec l'utilisation d'un taux de rendement synthétique ainsi que la localisation et le type de produits fabriqués. Différents scénarii, à politique industrielle identique, mais à localisation et type de produits différents sont simulés. L'objectif est de comparer les émissions de CO2 de ces configurations. Cette méthode est appliquée à deux secteurs différents : textile et mécanique. Les principaux objectifs de l'étude sont les suivants : développer des références pour la simulation de chaîne logistique, conduire des expériences pertinentes afin d'améliorer les chaînes logistiques vertes, tirer des conclusions quant à la délocalisation d'industries.
Mots clés : simulation, émissions de $CO_2$, chaîne logistique.

## Abstract
When enterprises are choosing suppliers, their performance and the price furnished are often the most important criteria considered. Little understood is the effect of only examining these two benchmarks can have on the greening of a supply chain. Meanwhile, rendering the supply chain more eco-friendly is an innovative idea progressively adopted by industry.
Our research focuses on the $CO_2$ emissions along the supply chain due to freight energy use and storage. A supply chain approach by using a discrete event model was developed. Our proposed tool is able to model Re Order Point production management policy (ROP). Moreover, it can consider the main demand response strategy Make To Stock (MTS). Manufacturing capability is also taken into account using an Overall Equipment Effectiveness indicator (OEE). In addition, the location of the firms and their types of products are modeled.

1

Simulations were conducted by varying the firm location and their type of product in MTS environment and a ROP planning policy. The purpose is to compare supply chain $CO_2$ emissions of different configurations. This method is applied to two industrial sectors: mechanical and textile industries. The principle objectives of the study are twofold: develop a supply chain simulation benchmark and conduct pertinent experiments to improve green supply chain and then relocalization.
Keywords : simulation, carbon emissions, supply chain

## 1. Introduction

La gestion de la chaîne logistique intéressa les entreprises dès les années 80. En effet, les collaborations tout au long de la chaîne logistique avec les fournisseurs et les clients se révèlent bénéfiques pour l'entreprise. Dans le même temps, l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature donna la première définition du développement durable qui passa presque inaperçu (Mebratu, 1998). En 1987, le rapport Bruntland introduit la définition de « développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs » (Bruntland, 1987). Les entreprises ont commencé à adopter ce concept ces dernières décennies car il leur permet de se différencier des autres. Ceci a pour résultats l'amélioration de facteurs environnementaux et sociaux, la réduction de coût et même l'augmentation de leur compétitivité. Aujourd'hui, le développement durable prend habituellement en compte trois paramètres : le progrès social, l'environnement et l'économie.
Or, la chaîne logistique manque encore d'outils conceptuels pour comprendre la complexité des liens entre les indicateurs industriels (principalement stocks et délais) et l'impact environnemental d'une gestion quotidienne. Par exemple, depuis 1993, Carrier (groupe UTC), un grand fabricant de climatiseurs, s'est employé à réduire son empreinte écologique. En 2003, l'Agence Américaine pour la Protection de l'Environnement l'a reconnu comme leader dans la protection environnementale. Il fabrique des produits innovants en travaillant sur la diminution de consommation d'eau et d'énergie. Dans un autre secteur, le textile, le groupe Zannier se concentre sur la conception de chaîne logistique verte. Il a centralisé ses achats et sa distribution dans le but de réduire son impact environnemental. Son principal problème est de choisir le fournisseur qui leur permettra d'avoir un impact écologique minimal sans affecter sa performance industrielle.
Notre article étudie comment la localisation des fournisseurs influence et la performance industrielle et la performance environnementale d'une chaîne logistique. Ainsi, notre modèle composé de trois entreprises manufacturières s'adressant à un client final évalue les émissions de $CO_2$ tout au long de cette chaîne logistique. Différents scénarii peuvent être générés pour comparer ces émissions. Un des objectifs est de déterminer le poids d'une relocalisation de fournisseurs ou de l'entreprise elle-même dans les émissions de $CO_2$. Pour ce faire, une simulation à événements discrets associe les paramètres standards d'une chaîne logistique composée d'entreprises de même efficience, de deux types de produits (dépendant de leur poids et de leur encombrement) et de quatre localisations. Nous évaluons leurs résultats en termes de niveau de stocks, de service au client et d'émissions de $CO_2$ dues au transport et au stockage.

L'article est organisé comme suit : la section 2 présente un bref état de l'art sur la modélisation et la simulation d'une chaîne logistique verte. La section 3 propose un modèle de chaîne logistique. La section 4 explique comment la bibliothèque du modèle a été définie. La section 5 présente la configuration et la calibration du simulateur et l'approche expérimentale. La section 6 montre les principaux résultats. La section 7 approfondit les résultats et donne des perspectives de gestion. Enfin, la conclusion fournit des perspectives de futures recherches.

## 2. Etat de l'art de la modélisation et de la simulation d'une chaîne logistique verte

Les entreprises sont de plus en plus poussées par leurs clients, leurs actionnaires et les gouvernements à adopter des mesures environnementales (Akono & Fernandes, 2009). De plus, plusieurs auteurs montrent de manière empirique que performance environnementale et performance financière sont liées positivement (King & Lenox, 2001), (Klassen & McLaughlin, 1996), (Porter & Van der Linde, 1995). D'autres articles établissent un lien entre initiatives vertes et augmentation de la compétitivité mais n'ont pas assez de preuves pour en mesurer l'importance (Rao & Holt, 2005), (Kiernan, 2001).
Pour évaluer la performance environnementale, des indicateurs verts ont été étudiés (Brent & Visser, 2005), (Siracusa, La Rosa, & Sterlini, 2004), (Scherpereel, Van Koppen, & Heering, 2001), (Tsoulfas & Pappis, 2008). En plus de cela, (Saling, et al., 2002) ont mené une analyse d'éco-efficience. Dans leur étude, où ils pondèrent les indicateurs selon un coefficient sociétal, ils indiquent que les trois principaux facteurs sont les émissions et les consommations d'énergie et de matières premières (approximativement 20% chacun). De plus, parmi les émissions, les émissions aériennes comptent pour 50%. Pour celles-ci, le $CO_2$, gaz à effet de serre, est la mesure de référence. Selon le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC), le principal problème auquel la planète doit et devra faire face est le réchauffement climatique résultant de l'augmentation des émissions de $CO_2$ (Soytas & Sari, 2007). Le Protocole de Kyoto a quantifié, pour les pays signataires, ces émissions en 1997. En se basant sur la littérature mentionnée ci-dessus, notre recherche se concentre donc sur les émissions de $CO_2$ le long d'une chaîne logistique.
Une étude de (Vachon & Mao, 2008) montre que la performance industrielle d'une chaîne logistique et un niveau faible d'émissions de gaz à effet de serre (principalement le $CO_2$) sont positivement liés. Un article basé sur une analyse à classification hiérarchique (AHP) propose de faire évaluer la chaîne logistique d'un point de vue environnemental par un groupe Delphi d'experts environnementaux (Handfield R. , Walton, Sroufe, & Melnyk, 2002). Cette méthode a été complétée en incluant un point de vue managérial (Lu, Wu, & Kuo, 2007). Mais l'AHP semble avoir quelques limites : il n'y a pas de hiérarchie simple pour la plupart des critères et le point de vue humain peut biaiser les résultats. (Chan, 2003) et (Kannan, Noorul, Sasikumar, & Aranuchalam, 2008) utilisent un modèle appelé Modèle de Sélection Interactive qui automatise les étapes de l'implémentation de l'AHP. Mais toutes des études reposent sur des analyses statistiques basées sur des données collectées. Ceci réduit les cas et requiert une grande qualité des données. Ces limitations nous ont motivé à proposer une autre approche méthodologique basée sur une simulation à événements discrets.

La méthode par simulation prend de plus en plus de place autant en recherches qu'en industries. En effet, l'un des avantages de la simulation est de pouvoir tester des scénarii avant de les appliquer réellement (Banks, 1998). Cette capacité à évaluer des scénarii « que se passe-t-il si ? » avec un grand panel d'entrées fait de la simulation un outil très utile pour l'analyse des chaînes logistiques (Hellström & Johnsson, 2002). Certains auteurs argumentent que l'actuelle popularité de la simulation est due à son excellente capacité à évaluer des systèmes variables et interdépendants (Wyland, Buxton, & Fuqua, 2000). Cela permet aux preneurs de décisions de choisir entre différentes solutions en connaissant l'impact de leur choix sur tous les maillons de la chaîne logistique.
Une étude récente utilise la simulation pour créer une chaîne logistique verte (Hui, Spedding, Bainbridge, & Taplin, 2006). Elle concerne la distribution d'aluminium et compare la pollution due au transport avec différents autres paramètres. Elle est basée sur des conditions idéales et les auteurs soulignent qu'il serait intéressant de rendre le modèle plus réaliste.
Par conséquent, étudier un indicateur $CO_2$ le long d'une chaîne logistique et démontrer le poids qu'il peut avoir sur la relocalisation paraît pertinent. Pour ce faire, un modèle de chaîne logistique est proposé ici afin d'analyser différents choix de localisations et de produits.

## 3. Modèle conceptuel de la chaîne logistique

Le modèle proposé (figure1) consiste en un fournisseur de matière première, une chaîne logistique composée de trois entreprises et d'un client final. Le fournisseur de matière première est considéré comme un stock infini. Les commandes du client final suivent une demande externe stochastique.

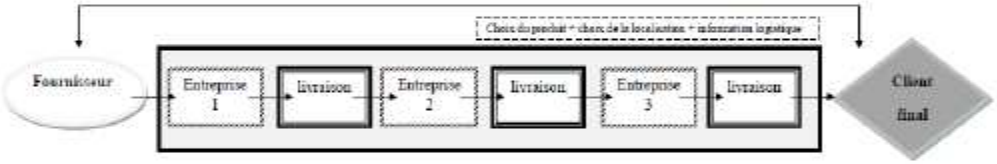



**Figure 1 : Modèle conceptuel de la chaîne logistique**

Entre chaque entreprise, un module livraison permet de simuler le transport et les stocks tampons inérants aux délais de livraison entre chaque entreprise (figure 2). Ce module est composé de :
- une ressource transport qui peut être un camion, un bateau ou un avion, selon la distance entre deux entreprises.
- des stocks tampons amont et aval qui sont dimensionnés selon la fréquence et le délai de livraison.

Un collecteur de données $CO_2$ est relié aux trois modules livraison.

4

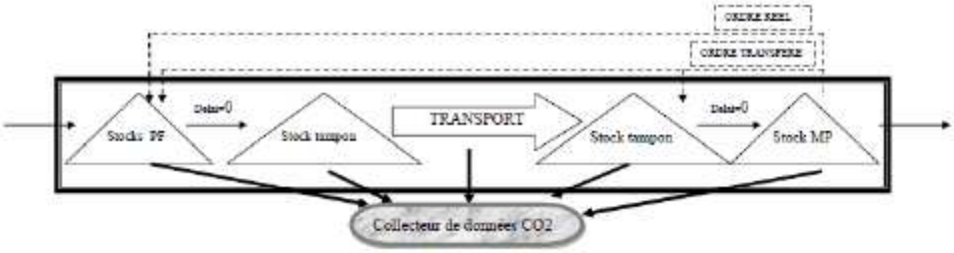



**Figure 2 : Illustration d'un module livraison**

Enfin, chaque entreprise comporte (Figure 3):
- un système de planification et de contrôle qui gère les achats par la stratégie de réponse à l demande et coordonne les flux selon une stratégie Make To Stock (MTS).
- un système physique composé de :
  - un module réception,
  - deux processus en série, transformant les matières premières (MP) en produits semi-finis (PSF) et les PSF en produits finis (PF). Les processus de production sont des lignes de transfert sur lesquelles deux flux de produits sont traités simultanément.

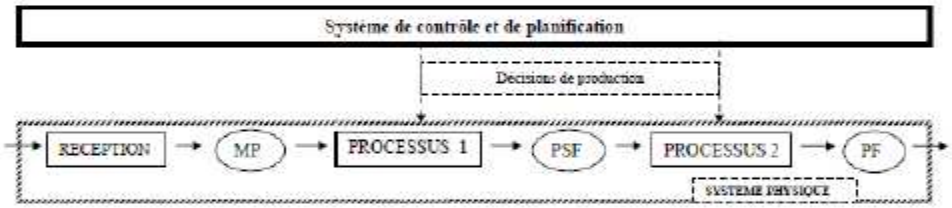



**Figure 3 : Module Entreprise**

## 4. Bibliothèque des paramètres d'entreprises

Une bibliothèque d'entreprises a été créée pour construire les trois maillons de la chaîne. Des données réelles de fabrication sont utilisées pour construire cette bibliothèque de manière réaliste. Dans cet article, les données proviennent de deux cas industriels : Carrier et le groupe Zannier. Plus généralement, les entreprises on été classées selon trois attributs : taux de rendement synthétique (TRS), localisation et type de produit fabriqué.

### 4.1. Taux de Rendement Synthétique (TRS)

Le modèle utilise un niveau d'efficience pour classer les systèmes industriels. Le TRS est défini comme suit : TRS = Disponibilité × Performance × Qualité. La Disponibilité est mesurée en temps d'arrêt de production. La Performance est évaluée à partir des pertes de

5

productivité. Enfin, la Qualité est définie en pourcentage de rebuts. Le TRS est un indicateur généralisé, facile à calculer pour les entreprises et offre une évaluation globale du processus de production. De plus, le TRS peut être implémenté facilement comme paramètre de simulation (cadences, pannes, taux de rebuts, temps de réglage). De nombreuses études donnent des niveaux de TRS selon des secteurs industriels variés (Konopka & Trybula, 1996), (Steege, 1996), (Leachman & Hodges, 1997), (Cigolini & Turco, 1997), (Waterson, Clegg, Bolden, Pepper, & Wall, 1999), (Ahmad & Dhafr, 2002), (Wacker & Sheu, 2006), (Muchiri & Pintelon, 2008). Le niveau usuel de TRS est compris entre 45% et 90% pour le secteur mécanique.

### 4.2. Localisations et types de produits

Les produits sont envoyés d'une entreprise à l'autre par avion, par bateau, par camion ou par combinaison de ces trois modes de transport. Pour calculer les émissions de $CO_2$, nous devons modéliser la distance entre deux compagnies et estimer le poids et l'encombrement des produits. Les émissions dépendent du poids transporté, de l'encombrement de stockage, du mode de transport employé et de la distance parcourue. En effet, l'unité des émissions de $CO_2$ est g ou kg par m² ou tonne.km.

D'abord, la distance entre deux maillons de la chaîne logistique est définie selon quatre possibilités. Le tableau 1 montre ces distances associées à leur délai de livraison. Dans le module livraison, en cas de retard, un mode de transport express est modélisé. Celui-ci est automatiquement choisi si la date de livraison (incluant le transport) n'est pas réalisable. Ici, la simulation à événements discrets est un outil puissant pour calculer de manière dynamique les retards et déclencher des transports express tout en respectant les contraintes de production (réglage, pannes, rebuts, stocks).

| localisation | Locale | Régionale | Continentale | globale |
|---|---|---|---|---|
| Distance en km | 50km | 500km | 1600km | 8000km |
| Délai de livraison | 5 heures | 2 jours | 1 semaine | 6 semaines |
| Stock tampon* | 5 heures | 2 heures | 35 heures | 210 heures |
| Délai pour un transport express | N/A | N/A | 2 jours | 2 jours |
| Fréquence de départ | Bi-journalier | journalier | Bihebdomadaire | hebdomadaire |
| Stock tampon* | 3,5 heures | 7 heures | 17,5 heures | 35 heures |

**Tableau 1: Spécifications des localisations *(pour la demande avale, exprimée en heures de consommation)**

Ensuite, nous avons ordonné les produits en quatre classes selon les attributs suivants : lourd/léger, encombrant/non encombrant. Les deux classes extrêmes seront étudiées : lourd/encombrant (1) et léger/non encombrant (2). Les deux autres catégories se retrouvent par combinaison linéaire. (1) est typique de l'industrie mécanique et sera illustré par les données de Carrier. (2) correspond au secteur textile et sera instancié avec les données du groupe Zannier. Le tableau 2 montre les données utilisées dans la simulation.

Les hypothèses suivantes ont été retenues pour calculer l'encombrement au sol des produits. Il n'est pas possible d'empiler des produits (1) donc leur dimension en m² corresponde à leur encombrement au sol. Pour les produits (2), des racks de cinq mètres de hauteur sont utilisés. Le nombre de produits stockables sur une telle hauteur est estimé et nous déterminons ainsi la

surface au sol nécessaire pour un produit. Enfin, dans le hangar de stockage, les allées et passages représentent 60% de la surface de stockage.

| secteur | Industrie mécanique | Industrie textile |
|---|---|---|
| catégorie | Chiller 30XA-1002 | Tee-shirt |
| Poids en tonnes | 8,44 | 0,0002 |
| Aire totale au sol en m² nécessaire au stockage d'un produit | 53,93 | 0,0005 |

**Tableau 2: Données des produits**

Le poids des produits et le nombre de kilomètres parcourus entre deux entreprises permettent de calculer les émissions de $CO_2$ dues au fret. L'Agence De l'Environnement Et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) détermine des émissions moyennes par tonne.km à partir d'émissions par véhicule.km et d'une estimation de poids transportés par véhicule. Le tableau 3 indique la valeur des émissions en $gCO_2$ équivalent par tonne.km selon le mode de transport employé. Pour les destinations locale, régionale ou continentale, le mode de transport est le camion ; pour la destination globale le bateau. L'avion sera employé pour les transports continentaux ou globaux express.

| Localisation | $gCO_2$ équivalent par tonne.km |
|---|---|
| Locale (l) | 145,10 |
| Régionale (r) | 74,90 |
| Continentale (c) | 74,90 |
| Globale (g) | 37.68 |
| Vol express continental | 570 |
| Vol express global | 320 |

**Tableau 3: Emissions de $CO_2$ dues au transport selon la localisation**

Pour le tableau 3, on notera que les camions utilisés pour les destinations locales sont plus petits que pour les destinations régionales ou continentales par conséquent les émissions par tonne.km de $CO_2$ sont plus importantes dans le premier cas. Pour les transports par avion, le décollage et l'atterrissage sont plus émetteurs de CO2 d'où les émissions par km plus élevées pour les moyens que pour les longs courriers. Le tableau 4 représente l'empreinte carbone en $kgCO_2$ par m² de la construction d'un hangar de stockage. Toutes ces données proviennent de l'ADEME.

| Stockage | Emissions de $CO_2$ |
|---|---|
| Hangar industriel | 75 |

**Tableau 4: Emissions de $CO_2$ en kg $CO_2$ équivalent par m²**

## 5. Modèle de simulation et calibrage

### 5.1. Configuration de la simulation

Avant de commencer la simulation, la chaîne logistique a besoin d'être configurée. Ajouter un type d'entreprise revient à choisir dans la bibliothèque : une localisation (l, r, c ou g) et un

7

type de produit (1 ou 2). Par conséquent, les trois maillons ont des profils différents. Une fois les informations extraites de la bibliothèque, le modèle est automatiquement formé. Le logiciel de simulation ARENA est utilisé.

### 5.2. Caractéristiques de la simulation

La demande finale suit une loi normale de moyenne 50 et d'écart-type 5 avec une fréquence d'arrivée journalière. Elle est directement transformée en ordre de livraison de produits finis qui suit une production sur stock (MTS). Si les produits finis sont en stock, ils sont automatiquement livrés. Sinon, si la date de livraison n'est pas réalisable, une livraison express est ordonnée pour les destinations continentales et globales. Deux stocks tampons sont prévus : l'un dû aux délais de livraison, l'autre dû aux fréquences de livraison.
Les processus de production, de réglage, de changement d'outillage suivent une loi triangulaire. La disponibilité est ajustée via les pannes qui sont modélisées par une fonction exponentielle. Cette dernière représente les temps moyens entre les pannes, les réparations et les réglages. La performance est réglée selon les cadences des machines. Tous ces paramètres sont fixés pour atteindre le taux d'efficience requis pour le cas étudié. Après avoir rentré ces variables dans le profil de l'entreprise, les variables de commande comme le point de pénétration de la commande et la taille de lots sont calibrés. Dans notre approche, ces variables sont calibrées pour minimiser au maximum les délais. Les stocks sont donc dimensionnés pour compenser les distances entre les entreprises. La calibration permet ainsi de comparer des chaînes logistiques avec une même efficience et de se focaliser sur les émissions de $CO_2$.
Vingt simulations de 10000 heures chacune sont effectuées pour chaque configuration. Les campagnes de simulations sont donc suffisamment nombreuses et longues pour dépasser la phase transitoire du système et tenir compte de la possibilité de phénomènes aléatoires.

## 6. Résultats des simulations

### 6.1 Délocalisation d'une entreprise

Les quatre possibilités de localisation et les deux types de produits permettent de simuler 128 configurations différentes. Aux vues de nos objectifs, les premières expériences traitent de configurations particulières. Pour chaque type de produit, nous comparerons des délocalisations de plus en plus lointaines : lll, rll, cll et gll puis lll, lrl, lcl et lgl enfin lll, llr, llc et llg. Ces 10 configurations seront analysées plus particulièrement dans un premier temps puis les 128 configurations seront étudiées dans un second temps.
A la figure 4, quelle que soit la destination, plus la délocalisation se situe en aval de la chaîne logistique plus les émissions de carbone sont importantes. Par exemple, la configuration lgl émet moins de $CO_2$ que la configuration llg. De plus, l'introduction d'une localisation régionale quelle que soit sa place dans la chaîne logistique émet toujours moins de $CO_2$ que l'introduction d'une localisation continentale. Il est intéressant de noter qu'une localisation continentale peut engendrer plus d'émissions de carbone qu'une localisation globale selon sa place dans la chaîne logistique. En effet, la configuration llc émet plus que les configurations gll ou lgl. Ceci s'explique par le fait que les retards, les rebuts se propagent en aval. Par conséquent, le dernier maillon requiert plus de transports express que les deux premiers pour

honorer la demande finale sans retard. Il est à noter que c'est grâce au modèle de simulation dynamique que nous avons pu identifier ce phénomène et que l'on peut raisonnablement penser que plus la chaîne serait longue plus il serait important. Les résultats sont les mêmes quel que soit le produit.

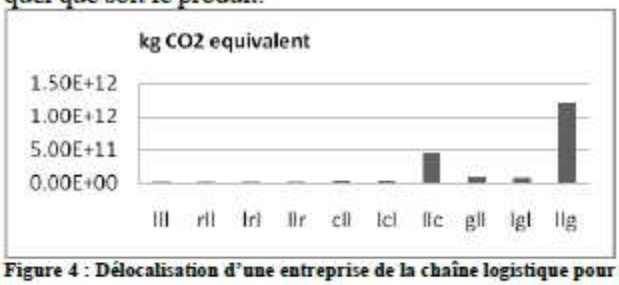



**Figure 4 : Délocalisation d'une entreprise de la chaîne logistique pour le produit 1**

## 6.2. Analyse des 128 configurations

L'analyse des 128 configurations est réalisée grâce à la méthode discrète des centres mobiles. Cette méthode permet de regrouper les configurations en six classes pour les émissions dues au stockage (tableau 5). Six configurations ont des émissions plus élevées que les autres : ggg, cgg, rgg, lgg, glg and grg.

| | effectif | % |
|---|---|---|
| **Moins de 6 000 000,00** | 65 | 50,8% |
| **De 6 000 000,00 à 12 000 000,00** | 0 | 0,0% |
| **De 12 000 000,00 à 18 000 000,00** | 33 | 25,8% |
| **De 18 000 000,00 à 24 000 000,00** | 15 | 11,7% |
| **De 24 000 000,00 à 30 000 000,00** | 9 | 7,0% |
| **30 000 000,00 et plus** | 6 | 4,7% |
| **Total** | 128 | 100,0% |

**Tableau 5 : classification des configurations selon les émissions de carbone dues au stockage pour le produit 1**

Les résultats selon les émissions de carbone dues au transport, au tableau 6, indiquent 10 groupes de configurations. Les deux derniers groupes englobent les configurations: llg, rrg, ccg, gcg puis lgg, glg, cgg, rgg, grg et ggg. Nous pouvons donc conclure que les configurations XXg sont les pires en termes d'émissions ; les configurations Xgg étant encore plus néfastes écologiquement.

| | effectif | % |
|---|---|---|
| **Moins de 300 000 000 000,00** | 96 | 75,0% |
| **De 300 000 000 000,00 à 600 000 000 000,00** | 9 | 7,0% |
| **De 600 000 000 000,00 à 900 000 000 000,00** | 13 | 10,2% |
| **De 900 000 000 000,00 à 1 200 000 000 000,00** | 0 | 0,0% |
| **De 1 200 000 000 000,00 à 1 500 000 000 000,00** | 4 | 3,1% |
| **1 500 000 000 000,00 et plus** | 6 | 4,7% |
| **Total** | 128 | 100,0% |

9

**Tableau 6 : Emissions de carbone dues au transport pour le produit 1**

Cette méthode est aussi utilisée au tableau 7 pour classer en six classes les configurations selon les deux modes d'émissions de carbone. Les six classes sont détaillées au tableau 8.

| Classe | effectif | % | Distance moyenne | stockage | transport |
|---|---|---|---|---|---|
| Classe n° 1 | 10 | 7.80% | 5.2E+20 | 16777089 | 1.1E+11 |
| Classe n° 2 | 10 | 7.80% | 7.5E+22 | 28694444 | 1.6E+12 |
| Classe n° 3 | 22 | 17.20% | 1.7E+22 | 20681069 | 6.3E+11 |
| Classe n° 4 | 14 | 10.90% | 1.3E+20 | 16047429 | 51382661615 |
| Classe n° 5 | 7 | 5.50% | 3.1E+19 | 12782296 | 19079280670 |
| Classe n°6 | 65 | 50.80% | 4.8E+17 | 191236 | 98340875 |

**Tableau 7: Classification des configurations selon les 2 modes d'émissions de carbone**

| | |
|---|---|
| classe 1 | rgr, grl, glr, cgr, gll, ggr, lgl, grr, ggl, rcl |
| classe 2 | rrg, gcg, cgg, grg, ggg, glg, lgg, llg, ccg, rgg |
| classe 3 | rcc, crc, clg, ccc, glc, lgc, grc, lcg, crg, rgc, llc, clc, rlc, lcc, lrc, rlg, rrc, rcg, lrg, gcc, cgc, ggc |
| classe 4 | rcr, gcl, cgl, grc, crr, ccl, rgl, lgr, cll, lcl, clr, lcr, crl, ccr |
| classe 5 | rrl, rlr, rrr, llr, rll, lrl, lrr |
| classe 6 | lll |

**Tableau 8 : Détails des 6 classes**

La figure 5 montre la distribution des 6 classes. La classe 2 a le plus haut niveau d'émissions dues au transport et au stockage. Elle comporte les configurations Xgg, gXg et XXg. La classe 3 présente un taux plus bas que la classe 2 et est composée des configurations Xcc, cXc. La classe 6 a le plus bas niveau des deux types d'émissions avec la configuration lll. La classe 5 émet plus de $CO_2$ dû au stockage que la classe 6 et contient les configurations qui sont des combinaisons de localisations régionales et locales. Les autres classes 1 et 4 sont concentrées et ont comme dernier maillon avec une localisation régionale ou locale. Ces résultats sont donnés pour le produit 1 mais les conclusions sont identiques pour le produit 2.

10

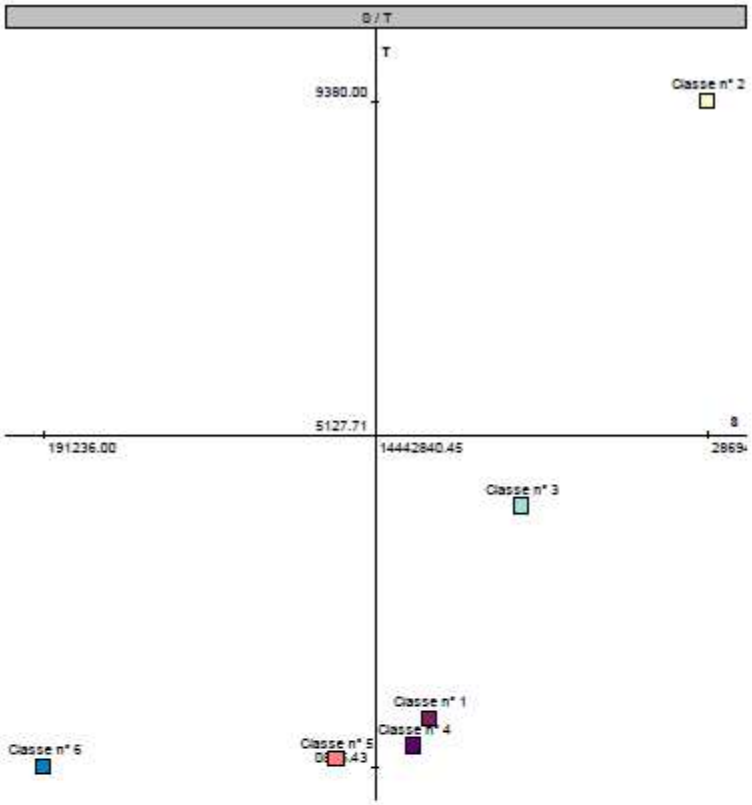



**Figure 5 : Distribution des classes selon leurs émissions de $CO_2$ dues au stockage et au transport**

## 6.3. Etude de cas

La chaîne logistique de l'entreprise Carrier a le profil suivant : lourd et encombrant avec une configuration lgg. En effet, un de ses fournisseurs est chinois et le propre fournisseur de ce dernier est aussi en Chine. Leur client final est mondial. Par conséquent, les résultats d'émissions de $CO_2$ sont de $1{,}79^{E}$+12 kg équivalent $CO_2$ pour un nombre moyen de chillers produits de 45 000 (tableau 9).

Deux choix sont possibles pour réduire les émissions de carbone :

- être plus près du client final (tableau 9) :

| Emissions dues au | lgl | lgr | lgc | lgg |
|---|---|---|---|---|
| transport | 9.54E+10 | 7.14E+10 | 5.11E+11 | 1.79E+12 |
| stockage | 1.51E+07 | 1.88E+07 | 2.12E+07 | 3.14E+07 |
| total | 9.54E+10 | 7.14E+10 | 5.11E+11 | 1.79E+12 |

11

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Baisse d 'un facteur de** | 19 | 25 | 3 | 1 |

**Tableau 9 : Emissions émises pour la relocalisation du client final en kg $CO_2$ équivalent**

- re-localiser des fournisseurs (tableau 10):

| **Emissions dues au** | **llg** | **lrg** | **lcg** | **lgg** |
|---|---|---|---|---|
| **transport** | 1.23E+12 | 7.90E+11 | 8.13E+11 | 1.79E+12 |
| **stockage** | 1.41E+07 | 2.53E+07 | 2.78E+07 | 3.14E+07 |
| **total** | 1.23E+12 | 7.90E+11 | 8.13E+11 | 1.79E+12 |
| **Baisse d'un facteur de** | 1.45 | 2.26 | 2.20 | 1.00 |

**Tableau 10 : Emissions émises pour la relocalisation de fournisseurs en kg $CO_2$ équivalent**

Le premier choix est certes le meilleur en terme de réduction de CO2 mais il est le moins réaliste. En effet, cela signifierait pour Carrier de multiples lieux de production. La seconde option est donc préférable et permet quand même dans le meilleur des cas de diviser par deux les émissions de carbone.

Le profil industriel du groupe Zannier est une production de produits léger et peu encombrant avec une configuration cgg. En effet, leur centrale d'achat a une politique européenne, leur fabrication est mondiale et leur client final également. Par conséquent, les résultats de la simulation sont de $4{,}21^{E}$+07 kg équivalent $CO_2$ pour une production moyenne de 45 000 tee-shirts (tableau 11).
Une option serait de produire en Europe. Ainsi les émissions deviendraient (tableau 11):

| **Emissions dus à** | **cgg** | **ccg** |
|---|---|---|
| **transport** | 4.21E+07 | 3.01E+07 |
| **stockage** | 2.98E+02 | 2.65E+02 |
| **total** | 4.21E+07 | 3.01E+07 |
| **Baisse d'un facteur de** | 1.00 | 1.40 |

**Tableau 11: Emissions émises pour la relocalisation de fournisseurs en kg $CO_2$ équivalent**

## 7. Discussion et implications managériales

Les résultats de la simulation mettent en lumière les faits suivants : quand la chaîne logistique est homogène, les émissions de carbone augmentent logiquement. Trois localisations locales émettent mois que trois régionales, qui émettent moins que trois continentales, qui émettent elles-mêmes moins que trois globales. Dans le cas d'une chaîne logistique très hétérogène (avec des localisations globales et locales), plus la localisation globale est en aval de la chaîne, plus la configuration ainsi formée est émettrice de $CO_2$. En effet, le second et par conséquent le troisième maillon de la chaîne logistique doivent absorber les retards et les rebuts de leurs prédécesseurs. Ainsi, il y a plus de transports requis en fin de chaîne et notamment des transports express. De manière générale, quand les configurations sont hétérogènes, plus la localisation éloignée est en aval de la chaîne, plus la chaîne logistique

12

émet de CO2 : les configurations llr, llc, llg sont plus émettrices que les configurations lrl, lcl, lgl qui, elles-mêmes, émettent plus que les configurations rll, cll, gll.
Ces résultats fournissent un guide pour les partenaires logistiques dans leur choix de fournisseur pour obtenir une chaîne logistique verte. Un fait qui n'est pas forcément trivial est de faire attention à la place de celui-ci dans la chaîne logistique. Plus le fournisseur sera placé en aval de la chaîne logistique plus il faudra prêter attention à sa localisation. Même si les premiers maillons sont proches les uns des autres, plus les derniers seront éloignés les uns des autres plus la chaîne logistique émettra de $CO_2$.
Cette étude montre qu'écologiquement la relocalisation des entreprises près de leur client final est très bénéfique. Or, les éco-quartiers ont pour valeur de réduire les différents impacts environnementaux avec notamment une réduction des émissions de $CO_2$ et une meilleure gestion des déplacements. Implanter les industries dans les zones périurbaines les rapprocherait de leur client final et une chaîne logistique la plus verte possible serait ainsi obtenue. De plus, les habitants des zones périurbaines pourraient y travailler ce qui réduirait l'impact écologique de leur propre transport. Par conséquent, relocaliser les entreprises au sein des zones périurbaines permettrait de répondre à la double exigence des éco-quartiers.

## Conclusion

**Dans cet article, nous avons développé, implémenté et évalué un modèle de chaîne logistique. La simulation est utilisée pour jauger une grande variété de scenarii de chaînes logistiques. Cet outil de simulation a été testé dans le cas d'un environnement de production en Make To Stock pour le flux de deux produits de deux types possible avec quatre localisations d'entreprise possibles. De manière inattendue, la localisation du dernier maillon influence considérablement les résultats de la simulation : il est donc très bénéfique écologiquement de localiser les industries près de leur client.**
**Concernant les premiers maillons, se pose à présent la question suivante : pour une chaîne logistique verte en terme de CO2, vaut-il mieux avoir un fournisseur éloigné mais avec un haut degré d'efficience ou un fournisseur proche avec un degré d'efficience moins élevé ? Nos prochaines recherchent se focaliseront sur cette question notamment en comparant les choix de localisations avec différents choix de TRS. Ainsi, nous simulerons une vue plus complète de la performance écologique de la chaîne logistique.**

## Bibliographie

Ahmad, M., & Dhafr, N. (2002). "Establishing and improving manufacturing performance measures". Robotics and Computer Integrated Manufacturing , 18, 171-176.

Akono, D., & Fernandes, (2009). "Impacts du développement durable sur les organisations logistiques". Management et Avenir , 26, 241-255.

Banks, J. (1998). Handbook of Simulation : Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice. New York: John Wiley.

13

Brent, A., & Visser, J. (2005). "An environmental performance resource impact indicator for life cycle management in the manufacturing industry". Journal of Cleaner Production , 13, 557.

Bruntland, G. (1987). http://www.ecoresponsabilite.environnement.gouv.fr./article.php3?id_article=65&theme_menu=. Consulté le 05 26, 2009, sur http://www.ecoresponsabilite.environnement.gouv.fr.

Chan, F. (2003). "Interactive selection model for supplier selection process : an analytical hierarchy process approach". International Journal of Production Research , 41 (15), 3549-3579.

Cigolini, R., & Turco, F. (1997). Total productive maintenance practices : a survey in Italy". Journal of Quality in Maintenance Engineering , 3 (4), 259-272.

Handfield, R., Walton, S., Sroufe, R., & Melnyk, S. (2002). "Applying environmental criteria to supllier asessment : A study in the application of the analytical hierarchy process". European Journal of Operations Research , 141, 70.

Hellström, J., & Johnsson, M. (2002). "Using discrete-event simulation in supply chain planning". The 14th Annual Conference for Nordic Researchers in Logistics.

Hui, K. H., Spedding, T. A., Bainbridge, I., & Taplin, D. M. (2006). Creating a green supply chain : a simulation and a modeling approach. Dans J.Sarkis, & J. S. edition (Ed.), Greening the supply chain (pp. 341-363). London: Springer.

Kannan, G., Noorul, H., Sasikumar, P., & Aranuchalam, S. (2008). "Analysis and selection of green suppliers using interpretative structura modelling and analytical hierarchy process". International Journal of Management and Decision Making , 9, 1.

Kieman, M. (2001). "Eco-value, sustainability and shareholder value : Driving environmental performance to the botton lin". Environmental Quality Management , 10, 1.

King, A., & Lenox, M. (2001). "Does it really pay to be green? An empirical study of firm environmental and financial performance". The Journal of Industrial Ecology .

Klassen, R., & McLaughlin, C. (1996). "The impact of environmental management on firm performance". Management Science , 42, 1199-1214.

Konopka, J., & Trybula, W. (1996). Overall Equipment Effectiveness (OEE) and cost. IEEE/CPMT-Electronics Manufacturing Technology Symposium.

Leachman, R., & Hodges, D. (1997). Benchmarking Semiconductor Manufacturing. IEEE/IRW Final report.

Lu, L. Y., Wu, C., & Kuo, T.-C. (2007). "Environnemtal principles applicable to green supplier evaluation by using multi-objective decision analysis". International Journal of Production Research , 45 (18-19), 4317-4331.

Mebratu, D. (1998). Sustainability and sustainable development : historical and conceptual review. Elsevier Science Inc.

Muchiri, P., & Pintelon, L. (2008). "Performance measurement using overall equipment effectiveness (OEE) : literature review and practical application discussion". International Journal of Production Research , 46 (13), 3517-3535.

Porter, M. E., & Van der Linde, C. (1995). Green and competitive : ending the stalemate. Harvard Business Review , 73, 120.

Rao, P., & Holt, D. (2005). "Do green supply chains lead to competitiveness and economic performance? " International Journal of Operations and Production Management , 25, 898.

Saling, P., Kicherer, A., Dittrich-Krämer, B., Wittlinger, R., Zombik, W., Schmidt, I., et al. (2002). "Eco-efficiency analysis by BASF : the method". The International Journal of Life Cycle Assessment , 7 (4), 203-218.

Scherpereel, C., Van Koppen, K., & Heering, F. (2001). "Selecting Environnemntal Performance indicators". Greener Management International , 9, 97-114.

Siracusa, G., La Rosa, A., & Sterlini, S. (2004). "A new methodology to calculate the environmental protection index. A case study applied to a company producing composite materials". Journal of Environmental Management , 73, 275-284.

Soytas, U., & Sari, R. (2007). "Energy consumption, economic growth, and carbon emissions : challenges faced by an EU candidate member". Ecological Economics , 68, 1667-1675.

Steege, P. (1996). Overall Equipment Effectiveness in Resist Processing Equipment. IEEE/SEMI- Advanced Semiconductor Manufacturing Conference.

Tsoulfas, G. T., & Pappis, C. P. (2008). "A model for supply chains environnemntal performance analysis and decision making". Journal of Cleaner Production , 1647-1657.

Vachon, S., & Mao, Z. (2008). "Linking supply chain strenght to sustainable development : a country-level analysis". Journal of Cleaner Production , 16, 1552-1560.

Wacker, J., & Sheu, C. (2006). "Effectiveness of manufacturing planning and control systems on manufacturing competitiveness : evidence from global manufacturing data". International Journal of Production Research , 44 (5), 1015-1036.

Waterson, P., Clegg, C., Bolden, R., Pepper, K., & Wall, T. (1999). "The use and effectiveness of modern manufacturing practices : a survey of UK industry". International Journal of Production Research , 37 (10), 2271-2292.

Wyland, W., Buxton, K., & Fuqua, B. (2000). Simulating the supply chain. IEE solutions , pp. 37-42.

www.carrier.fr consulté le 31/07/09

www.renault-trucks.com consulté le 05/06/09

www.tee-shirts-publicitaire.com consulté le 05/06/09

## III.2.5 Article accepté en juin 2011 à Production Planning and Control

# Analyzing carbon emission within supply chains: a discrete-event simulation approach

Anicia Jaegler[a, b,*] and Patrick Burlat[a]

[a]Division Manufacturing and Computer Sciences, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne
[b]Idrac Center of Applied Research, IDRAC International School of Management

Rendering the supply chain more eco-friendly is an innovative idea progressively adopted by industry. Our research focuses on the $CO_2$ emissions along the supply chain due to freight energy use and storage. A supply chain model based on discrete event simulation was developed. The model uses Re Order Point production management policy (ROP) within a Make To Stock (MTS) demand response strategy. Manufacturing capability is also taken into account using an Overall Equipment Effectiveness indicator (OEE). In addition, the location of the firms and their types of products are modeled. The purpose is to compare supply chain $CO_2$ emissions of different configurations. This method is applied to two industrial sectors: mechanical and textile industries. The principle objectives of the study are twofold: propose a supply chain simulation benchmark and conduct pertinent experiments for designing green supply chains.

Keywords: simulation; carbon emissions; supply chain.

## Introduction

Companies have been interested in supply chain management since the 1980s because of the benefit when collaborating downstream with suppliers and upstream with customers all along a chain. Meanwhile, the first definition of sustainable development was given by the International Union for the Conservation of Nature (Mebratu 1998) but passed almost unnoticed. In 1987, the Bruntland report incorporated the definition of "development that meets the needs of present without compromising the ability of future generations to meet their own needs" (Bruntland 1987). This concept has begun to be adopted among many companies during the last few decades. Moreover, sustainability has become a way in which organizations distance themselves from the pack, with the resulting improvement in environmental and social factors and the advantage of reducing cost or even increasing competitiveness. Nowadays, sustainable development usually takes into account the three parameters: social progress, environment and economic aspects.

However, the comprehensive and efficient design of supply chain still lacks some conceptual tools to understand the complex ties between industrial indicators (mostly inventory and delay) on one side, and the environmental impact of meeting their day to day needs on the other. For instance, Carrier (UTC group), a large cooler manufacturer, currently has dealt with a challenging design problem with some success. Since 1993, Carrier has strived to reduce its ecological footprint. In 2003, the American Agency for Environmental Protection recognized it as leader in environmental protection. They have produced innovative products while working on diminishing water and energy consumption. In another sector, textile, Zannier Group also looks for methodologies to design green supply chains. They have centralized purchasing and distribution with the aim of reducing their environmental impact. Roughly, their main problem is how to select suppliers so as to lessen environmental impact without adversely affecting industrial efficiency.

To address part of these concrete issues, our paper studies how localization of suppliers influences both industrial and environmental performance within a supply chain. While inspired by these two real life industrial cases, our model encompasses other settings as well. It consists of three manufacturers operating along the same value stream, and addressing a final market. With this, three tier supply chains can be evaluated in term of $CO_2$ emissions. Different scenarios can be generated to compare these emissions. One of the objectives is to determine best practices to balance green performance and supply chain efficiency. To do so, discrete event simulation is used to benchmark supply chains

composed of firms with various levels of efficiency, two types of products (depending on weight and bulk) and four different locales. We evaluate their resulting performances in terms of inventory levels, customer service, and $CO_2$ emissions due to storage and transportation.

The remainder of this paper is organized as follows: section 2 presents a brief state of the art on green supply chain modeling and simulation. Section 3 suggests a supply chain model. Section 4 explains the way an enterprise library of standard cases has been built to support the model. Section 5 discusses the configuration and the calibration of the simulator and explains the experimental approach. Section 6 shows the main results. Section 7 goes into further detail on these results and provides some managerial insights. Finally, the conclusion provides some perspectives on possible future research.

## Green supply chain modeling and simulation: state of the art

Increasingly, firms are pushed by their customers, shareholders and governments to adopt environmental measures (Hoffman 2007). Supply management is highly concerned: 50% of added value is now derived from supply chain (Ciliberti, Pontrandolfo and Scozzi 2008). Moreover, transport and storage seem to account for around 50% of environmental impact (Cholette and Venkat 2009). In this context, several authors show empirically that environmental and financial performances have a positive relationship (King and Lenox 2001, Klassen and McLaughlin 1996). Many papers have also indicated that it is financially beneficial for companies to adopt a green supply chain (Porter and Van der Linde 1995). Other articles also establish a link between green initiatives and increased competitiveness, but do not always have enough evidence to measure the importance (Kiernan 2001, Rao and Holt 2005).

To assess performance, many green indicators have been studied (Brent and Visser 2005), (Siracusa, La Rosa and Sterlini 2004). Several relevant indicators have been proposed: discharges of water, air emissions, solid wastes, toxic wastes, local nuisance, energy consumption, water consumption, raw materials and packaging use, investments for environment (Scherpereel, Van Koppen and Heering 2001). Examples of detailed indicators and their use in research are given in (Tsoulfas and Pappis 2008). On top of that, an eco-efficiency analysis has been conducted in (Saling, *et al.* 2002). In their study, the societal weighting factors used indicate that emissions, energy and raw materials consumption are the three principal factors (approximately 20% each). Additionally, air pollution emission accounts for 50% of all emissions. As most are aware, the greenhouse gas $CO_2$ is the measurement of reference. Furthermore, according to the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) the most important problem facing our planet is global warming with the resulting increase of $CO_2$ (Soytas and Sari 2007). Based on the aforementioned literature, our research focuses on the $CO_2$ emission indicator to assess eco-impacts of storage and transport along the supply chain.

Several studies have been conducted to analyze interactions between green efforts on $CO_2$ emissions and financial results. In a survey, (Vachon and Mao 2008) treated 8729 responses from 104 countries with a total of 10 variables. One of their results was that supply chain availability, quality, and lower level of greenhouse gas emission (mostly CO2 emissions) are positively linked. Another article based on analytical hierarchy process (AHP) proposed to evaluate a supply chain from environmental point of view through a Delphi group of environment experts (Handfield, Walton, Sroufe and Melnyk 2002). In a similar way, (Chan 2003) used a model called Interactive Selection Model which systemizes the processing steps before the implementation of AHP. The same approach was used by (Kannan, Noorul, Sasikumar and Aranuchalam 2008). A common result was that environmental efforts have potential to improve economic results as well. But all these studies rely on statistical analysis based on collected data, and could be complemented with a modeling oriented point of view. This motivated us to propose another methodological approach based on a discrete event simulation model.

Simulation methods are gaining more and more importance both in research and industrial practices. Indeed, making it possible to explore policies and operating procedures is one of the greatest advantages of simulation (Banks 1998). This ability to evaluate "what if" scenarios with a variety of inputs makes simulation a useful technique for analyzing supply chains (Hellström and Johnsson 2002). Some authors argue that the increasing popularity of simulation as a tool in supply chain management is due to its excellent capacity to evaluate system variation and interdependencies (Wyland, Buxton and Fuqua 2000). This enables a decision-maker to assess changes in part of the supply chain and visualize the impact of those changes on the other parts of the system, and ultimately on the efficiency of the entire supply chain (Umeda and Zhang 2006).

A recent study used the simulation to create a green supply chain (Hui, Spedding, Bainbridge and Taplin 2006). The study case concerned the distribution of aluminum metal and compared transport pollution, marketing costs, time to market, recycling of scrap metal and energy conservation. It is based on ideal conditions and the authors underlined that it could be interesting to make it more realistic.
Therefore studying a $CO_2$ indicator throughout a supply chain and demonstrating the changes with different management choices seems relevant. With these aims in mind, a data driven supply chain model is proposed here to analyze supply chains that differ by the location of the manufacturers involved.

**Supply chain conceptual model**

The proposed model, (Figure 1) consists of a raw material supplier, a supply chain composed of three enterprises, and a final customer. The raw material supplier is considered to have an infinite supply of stock. The final customer orders according to a stochastic external demand.
Between each enterprise, a delivery module will simulate transport and buffer storage due to delivery time amongst firms (Figure 2). It is composed of:
- a transportation resource to be chosen via truck, boat or plane, depending on the distance between enterprises.
- downstream and upstream inventory buffers that will be sized according to the frequency of delivery.

A $CO_2$ Data collector is attached to the delivery modules.
Within the chain, each single enterprise is comprised of (Figure 3):
- a Planning and Control System to manage procurements with a reorder point (ROP) rule, and synchronize the flows according to a Make to Stock (MTS) policy.
- a physical system made of:
  - a reception module,
  - two serial processes, transforming raw material (RM) into semi-finished goods (SFG) and SFG into finished goods (FG). These production processes are transfer lines where two product flows are simultaneously treated.

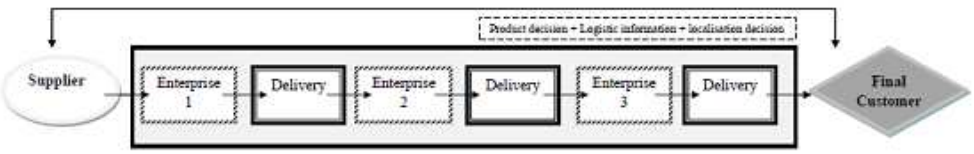



Figure 1 : Supply chain conceptual model

3

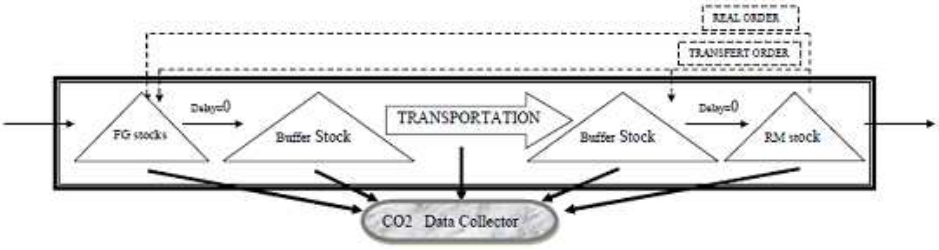



Figure 2 : Illustration of a delivery module

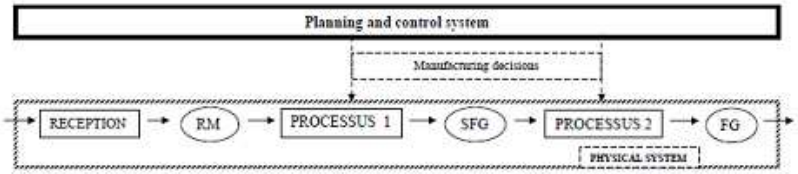



Figure 3 : Enterprise module

**Entreprise instance collection**

A library of enterprises has been built to provide the three tiers within the supply chain model. A consistent way to construct a realistic library was to utilize real manufacturing data to categorize production systems. In this article, the data came from the two industrial cases: Carrier and Zannier groups. More generally, in the model manufacturers have been classified according to three main attributes: Overall Equipment Effectiveness (OEE), localization and type of product.

***Overall Equipment Effectiveness***

An effectiveness level is used in the model as a metric to categorize the manufacturing systems. OEE is defined as follows: OEE = Availability × Performance × Quality. Availability is measured in amount of downtime. Performance is assessed in losses of speed. Finally, Quality is gauged by percentage of defects. The OEE indicator is widespread, easy to calculate for firms and offers a comprehensive evaluation of a production process. Furthermore, OEE can be embodied quite easily within simulation parameters like cadences, breakdowns, scrap rates and set up times. Many studies have provided OEE levels in various industrial sectors (Konopka and Trybula 1996), (Steege 1996), (Leachman and Hodges 1997), (Cigolini and Turco 1997), (Waterson, Clegg, Bolden, Pepper and Wall 1999), (Ahmad and Dhafr 2002), (Wacker and Sheu 2006), (Muchiri and Pintelon 2008). Benchmarks report that the usual OEE ranges from 45% to 90% in mechanical industry. The typical world class manufacturing target tends to be approximately 90 %.

Table 1 shows the OEE factor that will be used in the simulation case.

Table 1 : OEE factor value

| | |
|---|---|
| OEE | 89% |
| Availability | 95% |

4

| | |
|---|---|
| Performance | 97% |
| Quality | 97% |
| Cadence [piece per minute] (C) | 0.10 |
| Planned time of production [h] | 10 |

Note that unavailability will be composed here of 40% breakdowns, 40% set up and 20% idle time.

Then, in Table 2, data are calculated with the inverse operations of the terms of the OEE, so as to feed the model with simulation parameters.

Understand that different values for Availability, Performance and Quality could lead to the same 89% OEE. So, these parameters were further fine tuned in accordance with data collected from the industrial cases, and checked with benchmarks. For instance, a quality level equal to 97% or a 1.5 hour Mean Time to Repair is quite common in the mechanical sector. Moreover, the values given in table 2 are average target data: some variations near to the mean value are randomly added when simulating.

Table 2 : Process parameters

| | |
|---|---|
| Productive Time (PT=OEE*Planned time of production) | 8.94 |
| Net Operational Time (NOT=PT/quality) | 9.22 |
| Operational Time (OT=NOT/performance) | 9.50 |
| Unavailability Time (UT=planned time of production-OT) | 0.50 |
| | |
| Breakdown Time (UT*%UB, with UB = 40%) | 0.200 |
| Set up Time (UT*%US, with US = 40 %) | 0.200 |
| Idle Time (UT*%UI, with UI = 20 %) | 0.100 |
| | |
| MTBF | 200 |
| MTTR | 1.50 |
| | |
| Bottleneck Mean Process Time [h] (BMPT=1/(APR*60)) | 0.172 |
| % Variability of Process Time (VPT) | 10% |
| Bottleneck Min Process Time [h] (BMPT-BMPT*%VPT) | 0.155 |
| Bottleneck Max Process Time [h] (BMPT+BMPT*%VPT) | 0.189 |
| Non-Bottleneck Excess Process Time | 20% |
| Non- Bottleneck Mean Process Time [h] (BMPT+BMPT*%NBEPT) | 0.137 |
| Non- Bottleneck Min Process Time [h] (NBMPT-NBMPT*0,137) | 0.124 |
| Non- Bottleneck Max Process Time [h] (NBMPT+NBMPT*0,137) | 0.151 |
| Unit Setup Time (UST) | 0.050 |
| % of Change Over Excess Time (COET) | 20% |
| Changeover Time (UST-UST*%COET) | 0.060 |
| Handeling Time / Process Time | 10% |
| Handeling Time (BMPC*HT/PT) | 0.017 |

***Plant locations and types of products***

Shipment of raw materials, parts, and finished goods from one location to the next in a supply chain happens by land, sea, and air or some combination therein. To calculate the $CO_2$ emissions, we need to model the shipping

5

distance between two companies as well as estimate the weight and bulk of the manufactured product. Transport pollution types and levels are dependent on cargo weight, mode of transportation and distance travelled. Indeed, the unit of the $CO_2$ emissions is calculated in g or kg per m² or ton-km.

First, the plant locations are defined by four areas representing the distance between two successive echelons of the supply chain. Table 3 shows these distances with associated delivery times. In the transportation module, in case of delays, a speedy transportation mode is modeled: an express transportation is automatically selected when the expected delivery date is unattainable (including the transport time). Here, discrete event simulation provides a powerful tool to dynamically calculate the delays and trigger express transports with respect to the manufacturing parameters (set up, breakdowns, scraps items and inventory buffers).

Table 3 : Location specifications

| areas | Local | Regional | Continental | global |
|---|---|---|---|---|
| Distance in km | 50km | 500km | 1600km | 8000km |
| Time for delivery | 5 hours | 2 days | 1 week | 6 weeks |
| Buffer storage (for downstream demand, expressed in hours of consummation) | 5 hours | 2 days | 1 week | 6 weeks |
| Time for express delivery | N/A | N/A | 2 days | 2 days |
| Departure frequency | Twice a day | Each day | Twice a week | Each week |
| Buffer storage (for downstream demand, expressed in hours of consummation) | 3,5 hours | 7 hours | 17,5 hours | 35 hours |

Second, we have categorized products into four types according to the following attributes: heavy/light and bulky/small. Figure 4 indicates four different product configurations. Only the two extremes are studied: bulky/heavy and small/light. The others are linear combinations of the other two.

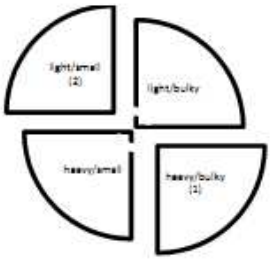



Figure 4 : Sector classification

Configuration 1 is typical of the mechanical industry, and will be illustrated by data from Carrier. Configuration 2 is widespread in the textile industry and will be instanced with data from Zannier group.

Table 4 shows the data used in the simulations. The following hypotheses have been defined to calculate the products ground clutter: It was not possible to stack a heavy/bulky product so their dimensions in m² are equal to their total floor space. For the second sector, five meters high storage racks are used. How many products can be stacked at this height are estimated to determine rack shelf surface area needed for one product. In the warehouse, aisles and passages represent 60% of the total.

Table 4: Product data

| Product class | 1 | 2 |
|---|---|---|
| Weight in tones | 8,44 | 0,0002 |
| Total surface area in m² | 53,93 | 0,0005 |

For freight energy use, only the weight of the product and the number of kilometers between two firms are used. The French Agency of the Environment and the Energy Mastery

(ADEME) provides the figures of $CO_2$ emissions per ton-km. They determine an average emission per ton-km from an emission per vehicle.km as well as estimate an average weight of goods transported by vehicle. Table 5 indicates the number of $CO_2$ emissions in $gCO_2$ equivalent per ton-km according to the transportation. For the local, regional and continental loci trucks are often used. Worldwide delivery employs container shipping. Urgent shipping requires trucking for short routes and air freight for long distances. As aforementioned, in the model, if these are delays, then express transportation is automatically selected.

Table 5: $CO_2$ emissions due to the transportation according to the location (uncertainty)

| Location | $gCO_2$ eq. per ton-km |
|---|---|
| Local (l) | 145,1 10%) |
| Regional (r) | 74,9 (10%) |
| Continental (c) | 74,9(10%) |
| Global (g) | 37.68(10%) |
| Express continental air freight | 570(20%) |
| Express global air freight | 320(20%) |

To explain more fully the figures from table 5 it is important to know that for local transportation, the trucks used are smaller than for the regional or continental shipping so the $CO_2$ emissions are higher per kg.km. When time is of the essence, planes are used and they emit more $CO_2$ during take-offs and landings than during the flight itself. Therefore, emissions per km are significantly higher for medium haul than long haul.

Table 6 represents the carbon footprint of construction in terms of kg $CO_2$ equivalent per m². The warehouse is considered as an industrial shed. All these data comes from ADEME.

Table 6: $CO_2$ emissions in kg $CO_2$ equivalent per m² (uncertainty)

| storage | $CO_2$ emissions |
|---|---|
| Industrial shed | 75(50%) |

**Simulation model and calibration**

***Configuring simulation***

Before the start of the simulation, the supply chain needs to be configured. Adding a manufacturer type to the library entails (i), selecting a locale (l, r, c and g), (ii) choosing a type of product (product classes 1 or 2). Moreover, the three tiers may have different OEE profiles.

So, profiling the simulation model requires three steps:

- The product flows are configured by means of macro-nomenclatures representing the bill of material to be treated in the production processes within the supply chain. The simulation platform is composed of stations made of independent sub models. Branching conditions lead to an automatic simulator configuration according to OEE levels. At this step, resources and entities are created in the simulation software.
- Locations are chosen for each tier. At this moment, the attributes of each of the resources are calculated: storage, duration, express transportation,…
- Types of products are chosen for the supply chain. The attributes (weight and rack shelf surface required) are implemented for the calculation of $CO_2$ emissions due to the storage and the transportation.

***Simulation characteristics***

Final customers are modeled with a normal stochastic distribution with average of 50 units, a standard deviation of 5 at an arrival frequency of once a day. Customer requests are directly transformed into delivery orders at the finished goods, following a Make To Stock policy. If enough finish goods are available, then delivery proceeds from stock. Otherwise, a delay is recorded in case for local or regional destinations. If the order date is overdue, an express transportation is effectuated in case for continental or global shipping. A buffer stock due to the delay of transportation is forecasted and another buffer is required for the lead-time between two transportations departures.

Production processes, set up and changeover times have been modeled using stochastic triangular distributions with variability. Availability is adjusted via breakdowns modeled by exponential functions representing mean times among failures and repairs and set up times. Performance is set via machines cadences. All these parameters are fixed to meet effectiveness target values, and correspond to average measures from our case studies. After having set these variables in an enterprise profile, command variables such as replenishment reorder points and batch sizes are calibrated. In our approach, the command variables have been calibrated so that the supply chains always meet the final demand without any delay. This means that extra inventory buffers have been sized to compensate for the distance between firms in the case of regional, continental and global locations. This calibration makes it possible to compare supply chains offering identical customers' performance, and to focus on $CO_2$ emissions.

ARENA simulation software is used. Twenty simulation runs of 10 000 hours were performed for each configuration. Simulation campaigns are sufficiently numerous and long-term to overcome the system's transitional phase and seem to take account the possibility of most random phenomena.

**Results of simulation**

128 configurations can be simulated because two types of product can be chosen and four locations can be designated. To deal progressively with the problem, our first experiments focused on a range of specific configurations, some very homogeneous or heterogeneous.

For each type of product:
- Homogeneous configurations : lll, rrr, ccc,ggg,
- Configurations where the location becomes increasingly distant from the first tier: lll, rll, cll, gll ; then from the second tier : lll, lrl, lcl, lgl; lastly from the third tier : lll, llr, llc, llg.
- Configurations with extreme differences of location: llg, lgl, gll and lgg, glg, ggl.

First, these 32 configurations will be carefully analyzed. Second, all the 128 possible configurations will be explored.

***Homogeneous configurations***

*Influence of the type of product*

Concerning storage, when the carbon emission of homogeneous configurations is analyzed, the influence of the product appeared considerable. We observe a constant factor of 108 000 for the $CO_2$ emissions due to storage for both the results of heavy/Bulky and light/small, no matter what location (Table 7).

Table 7: kg $CO_2$ equivalent according to storage

| location/ product | 1 | 2 |
|---|---|---|
| 3local | 1.2E+07 | 1.2E+02 |
| 3regional | 1.3E+07 | 1.2E+02 |
| 3continental | 1.9E+07 | 1.7E+02 |
| 3global | 3.3E+07 | 3.1E+02 |

Concerning transportation, different factors were observed for the carbon emissions (Table 8). The most important is for the location local-local-local (here after named "3 local").

Table 8: kg $CO_2$ equivalent according to transportation

| location/ product | 1 | 2 |
|---|---|---|
| 3local | 5.65E+09 | 6.91E+04 |
| 3Regional | 2.92E+10 | 6.91E+05 |
| 3Continental | 7.30E+11 | 1.73E+07 |
| 3Global | 2.00E+12 | 4.74E+07 |

*Homogeneity of configurations*

Emission results due to storage are similar according to a factor, no matter what product. Therefore, only the emissions for products heavy and bulky are now to be reported. The maximum storage of each configuration was used to consider the maximal capacity of the shed. First, figure 5 shows that the 3 local and 3 regional configurations are almost identical. The 3 continental configuration produces 50% more emissions than the first two. However, even more significantly, the 3 global configuration produces almost twice as much again.

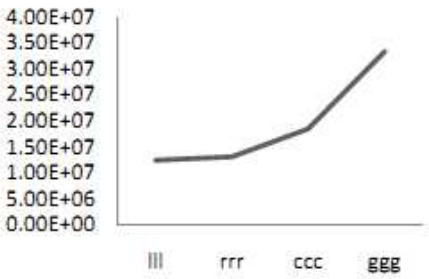



Figure 5 : kg $CO_2$ equivalent for product 1 storage

Except for 3 regional versus 3 local, the multiplying factor between two configurations is the same whatever the product (Table 9). The 3 regional locations augment the pollution impact by a factor between 5 and 10 as compared to the 3 local. The 3 continental configuration increases by a factor of 25 as contrasted to the 3 regional configuration (higher number of kilometers and express transportation). The 3 global configuration raises by a factor of 3 compared to 3 continental configuration (more transportation emissions).

Table 9: Differences of $CO_2$ emissions between two locations and the products

| location-product | 1 | 2 |
|---|---|---|
| 3 regional/3 local | 5 | 10 |
| 3 continental/3regional | 25 | 25 |
| 3 global/3 continental | 3 | 3 |

9

***Delocalization of the last tier of the supply chain***

Figure 6 indicates that the delocalization of the last tier entails an increase of $CO_2$ emissions between each configuration. It is the same for product 2 as shown in figure 7.

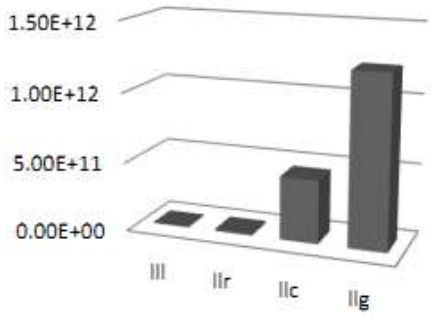



Figure 6 : Gradual delocalization of the last tier for product 1

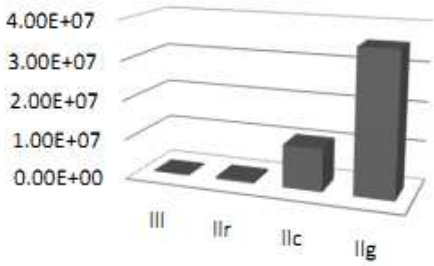



Figure 7 : Gradual delocalization of the last tier for the product 2

***Delocalization of one site***

In figure 8, whether local or continental, the farther downstream the delocalization is in the supply chain the higher the emissions are. For instance, lgl configuration has less emission than llg configuration. More than that, the introduction of a regional location -no matter where - is less penalizing in emissions than a

continental location. Interesting, the continental location is itself less penalizing than a global location, but the llc configuration emits more than gll or lgl. Indeed, uncertainties due to scrapped items and breakdowns propagate from upstream to downstream. So the last tier requires much more express transports than the two other tiers to meet the final demand without delay. Note that this effect is visible thanks to the dynamic simulation model, and that it would be stronger within a longer supply chain. The results are the same for the product light and small.

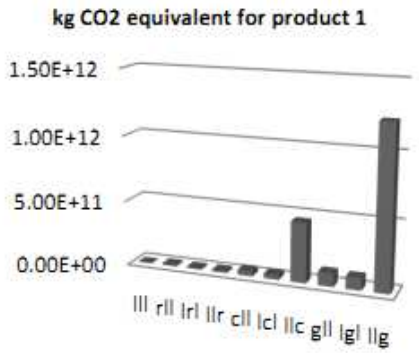



Figure 8 : Delocalization of one site in the supply chain for product 1

***Extreme differences in locales***

When analyzing very heterogeneous locations, it appears that the XXg configurations are those that emit the most $CO_2$. It is important to note that the last place or tier is crucial if you wish to abate the creation of $CO_2$.

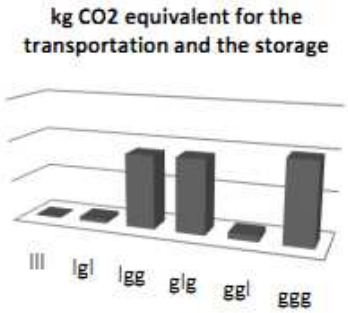



Figure 9 : Significant delocalization of the choice of tier combinations for product 1

***Analyzing the 128 configurations***

Discrete Mobile Centers method is used to analyze the 128 configurations and to group $CO_2$ emissions into 6 classes (table 10). Six locations emit more $CO_2$ due to storage than the others (ggg, cgg, rgg, lgg, glg and grg) (table 10).

Table 10: $CO_2$ emissions due to storage classification for product 1

| | number | % |
|---|---|---|
| less than 6 million | 65 | 51 |
| From 6 to 12 million | 0 | 0 |
| From 12 to 18 million | 33 | 26 |
| From 18 to 24 million | 15 | 12 |
| From 24 to 30 million | 9 | 7 |
| 30 million and more | 6 | 5 |
| Total | 128 | 100 |

For $CO_2$ emissions due to transportation (table 11), there are 10 classes of locations: llg, rrg, ccg, gcg then lgg, glg, cgg, rgg, grg and ggg. Our initial conclusions about the configurations XXg are confirmed. Obviously, the worst configurations for transportation pollution are Xgg.

Table 11: $CO_2$ emissions due to transportation for product 1

| | number | % |
|---|---|---|
| less than 300 billion | 96 | 75 |
| From 300 to 600 billion | 9 | 7 |
| From 600 to 900 billion | 13 | 10 |
| From 900 to 1 200 billion | 0 | 0 |
| From 1 200 to 1 500 billion | 4 | 3 |
| 1 500 billion and more | 6 | 5 |
| Total | 128 | 100 |

Discrete Mobile Centers method (table 12) is also used to categorize the locations with both transport and storage $CO_2$ emissions. Six classes were obtained (table 13).

Table 12: Location and product classification according to $CO_2$ emissions

| Class | % | Storage | transportation |
|---|---|---|---|
| 1 | 8 | 2E+7 | 1E+11 |
| 2 | 8 | 3E+7 | 2E+12 |
| 3 | 17 | 2E+7 | 6E+11 |
| 4 | 11 | 2E+7 | 5E+10 |
| 5 | 5 | 1E+7 | 2E+10 |
| 6 | 51 | 2E+5 | 1E+8 |

Table 13: Location according to classes

| | |
|---|---|
| class 1 | rgr, grl, glr, cgr, gll, ggr, lgl, grr, ggl, rcl |
| class 2 | rrg, gcg, cgg, grg, ggg, glg, lgg, llg, ccg, rgg |
| class 3 | rcc, crc, clg, ccc, glc, lgc, grc, lcg, crg, rgc, llc, clc, rlc, lcc, lrc, rlg, rrc, rcg, lrg, gcc, cgc, ggc |
| class 4 | rcr, gcl, cgl, grc, crr, ccl, rgl, lgr, cll, lcl, clr, lcr, crl, ccr |
| class 5 | rrl, rlr, rrr, llr, rll, lrl, lrr |
| class 6 | lll |

Figure 10 shows the distribution of 6 classes. Class 2 has the highest level for emissions due to storage and transportation. We find Xgg, gXg and XXg configuration for product 1. Class 3 presents fewer emissions than Class 2 and is composed of Xcc, cXc. Class 6 has the lowest level for both emissions with the 3 local configurations. Class 5 emits more according to storage than class 6 and is composed of configurations which are combinations of regional and local. The other classes 1, 4 are concentrated and are composed of regional or local in the last tier. If an analysis of product 2 were to be presented the same classification would be found with a decrease of an average of $10^5$.

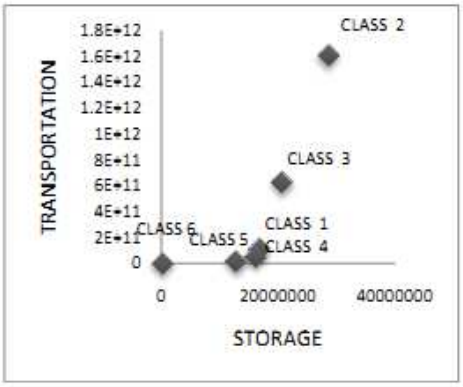



Figure 10: Distribution of classes according to emissions due to storage and transportation in kg $CO_2$ eq.

***Study cases***

For Carrier, the manufacturer profile is: fairly heavy and bulky products with a location arrangement lgg. Indeed, their principal supplier is Chinese whose subcontractor is also in China. The final customer is global. So the results of the simulation are for an average of 45 000 heavy duty air conditioners or chillers produced:

Table 14: lgg configuration results in kg $CO_2$ eq.

| | |
|---|---|
| transport | 1.79E+12 |
| storage | 3.14E+07 |
| total | 1.79E+12 |

Two choices to abate the $CO_2$ emissions are possible:

- To be closer to the final client:

Table 15: Results for delocalization of the production in kg $CO_2$ equivalent

| emissions due to | lgl | lgr | lgc | lgg |
|---|---|---|---|---|
| transport | 9.54E+10 | 7.14E+10 | 5.11E+11 | 1.79E+12 |
| storage | 1.51E+07 | 1.88E+07 | 2.12E+07 | 3.14E+07 |
| total | 9.54E+10 | 7.14E+10 | 5.11E+11 | 1.79E+12 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| decrease of a factor of | 19 | 25 | 3 | 1 |

- To re-localize the suppliers:

Table 16: Results for re-localization of the suppliers in kg $CO_2$ equivalent

| emissions due to | llg | lrg | lcg | lgg |
|---|---|---|---|---|
| transport | 1.23E+12 | 7.90E+11 | 8.13E+11 | 1.79E+12 |
| storage | 1.41E+07 | 2.53E+07 | 2.78E+07 | 3.14E+07 |
| total | 1.23E+12 | 7.90E+11 | 8.13E+11 | 1.79E+12 |
| decrease of a factor of | 1.45 | 2.26 | 2.20 | 1.00 |

The first choice is the best in term of reduction of $CO_2$ emissions. However, this is the least realistic option because it needs multiple re-localization and decentralization of the production of Carrier. While the second choice would be preferred, nevertheless, the first remains the best way since the emissions are reduced by a factor of 2.

For Zannier group, the manufacturer profile is: light and small products with a location cgg. Indeed, their central purchasing buys in Europe, then the fabrication is global as is the final customer. So the results of the simulation are in kg $CO_2$ equivalent for an average of 45 000 tee-shirts produced:

Table 17: cgg configuration results in the kg $CO_2$ eq.

| | |
|---|---|
| transport | 4.21E+07 |
| storage | 2.98E+02 |
| total | 4.21E+07 |

One option that could be recommended is to produce in Europe. In this case, the configuration becomes ccg and the results are:

Table 18: Results for re-location of the suppliers in kg $CO_2$ equivalent

| emissions due to | cgg | ccg |
|---|---|---|
| transport | 4.21E+07 | 3.01E+07 |
| stockage | 2.98E+02 | 2.65E+02 |
| total | 4.21E+07 | 3.01E+07 |
| decrease of a factor of | 1.00 | 1.40 |

**Discussion and managerial implications**

Simulation results highlight the following findings: according to the type of product, the $CO_2$ emissions could increase of a factor of for storage and for transportation. When the supply chain is homogeneous, the $CO_2$ emissions logically increase in order 3 local, 3 regional, 3 continental, 3 global. If the supply chain is very heterogeneous (containing local and global locations), then the green performance degrades as the global locations are located further downstream the supply chain. Indeed, the second and also the last tier have to absorb the delays and so on of the upstream tier. Therefore there is more transportation required at the end of the supply chain as well as more express transportation. Generally, when the arrangement is heterogeneous, the more distant the location is downstream the more their $CO_2$ emissions increase: llr, llc, llg are emitting more $CO_2$ than lrl, lcl, lgl and than rll, cll, gll.

**Conclusion and perspectives**

In this paper a supply chain model is developed, implemented and assessed. Simulation is used to evaluate a wide variety of supply chain scenarios. This simulation tool has been tested in the case of a supply chain in a make to stock

environment to produce two flows of products with two types of products and with four locations choices (local, regional, continental and global). The results provide a basic guide for logistics partner selection helping to choose their supplier to optimize their green supply chain. Types of products affected the $CO_2$ emissions considerably. The effect was linear. Unexpectedly, last tier's locations have significantly influenced simulation results with global locales being the worst choice. So it is crucial to pay attention to the position of the farthest link in the chain. Even if the first two locations are quite close, farther the end producer is from the final customer more the emissions increase.

This brings an irksome question: in a green supply chain, would it be better in term of $CO_2$ emissions to have in place a local supplier with poor production management and high stocks, or a global supplier with world class results and lean inventories? Future work may focus on this question by decreasing the OEE performance of some tiers and fine tuning consequently the simulation parameters. A more complete view of the ecological performance of enterprises with various OEE levels could be simulated.

**Acknowledgments**

The authors wish to thank Chris Yukna for the helping in English and Fabienne Coruble for her help with the data from Carrier.

**References**

Ahmad MM & Dhafr N (2002) Establishing and improving manufacturing performance measures. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* 18:1, 71-176.

Banks J (1998) Handbook of Simulation : Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice New York: John Wiley,

Brent AC & Visser JK (2005) An environmental performance resource impact indicator for life cycle management in the manufacturing industry". Jion, Vol. 13, p. 557. *Journal of Cleaner Production* 13:557.

Bruntland G (1987) (http://www.ecoresponsabilite.environnement.gouv.fr./article.php3?id_article=65&theme_menu=. ).

Chan FTS (2003) Interactive selection model for supplier selection process : an analytical hierarchy process approach. *International Journal of Production Research* 41(15):3549-3579.

Cholette S & Venkat K (2009) The energy and carbon intensity of wine distribution: A study of logistical options for delivering wine to consumers. *Journal of Cleaner Production* 17(16):1401-1413.

Cigolini R & Turco F (1997) Total productive maintenance practices : a survey in Italy. *Journal of Quality in Maintenance Engineering* 3(4):259-272.

Ciliberti F, Pontrandolfo P, & Scozzi B (2008) Logistics social responsibility: Standard adoption and practices in Italian companies. *International Journal of Production Economics* 113(1):88-106.

Handfield R, Walton S, V., Sroufe R, & Melnyk S, A. (2002) Applying environmental criteria to supllier asessment : A study in the application of the analytical hierarchy process. *European Journal of Operations Research* 141:70.

Hellström JB & Johnsson M (2002) Using discrete-event simulation in supply chain planning. *The 14th Annual Conference for Nordic Researchers in Logistics*.

Hoffman W (2007) Who's Carbon-Free? *Traffic World* 271(42):15-15.

Hui KH, Spedding TA, Bainbridge I, & Taplin DMR (2006) Creating a green supply chain : a simulation and a modeling approach. *Greening the supply chain*, ed edition JS London: Springer, 341-363.

Kannan G, Noorul H, A., Sasikumar P, & Aranuchalam S (2008) Analysis and selection of green suppliers using interpretative structura modelling and analytical hierarchy process. *International Journal of Management and Decision Making* 9:1.

Kiernan M, J. (2001) Eco-value, sustainability and shareholder value : Driving environmental performance to the botton lin. *Environmental Quality Management* 10:1.

King A & Lenox M (2001) Does it really pay to be green? An empirical study of firm environmental and financial performance. *The Journal of Industrial Ecology*.

Klassen RD & McLaughlin C (1996) The impact of environmental management on firm performance. *Management Science* 42:1199-1214.

Konopka J & Trybula W (1996) Overall Equipment Effectiveness (OEE) and cost. *IEEE/CPMT-Electronics Manufacturing Technology Symposium*.

Leachman RC & Hodges DA (1997) Benchmarking Semiconductor Manufacturing. *IEEE/IRW Final report*.

Mebratu D (1998) Sustainability and sustainable development : historical and conceptual review. *Elsevier Science Inc.* .

Muchiri P & Pintelon L (2008) Performance measurement using overall equipment effectiveness (OEE) : literature review and practical application discussion. *International Journal of Production Research* 46(13):3517-3535.

Porter ME & Van der Linde C (1995) Green and competitive : ending the stalemate. *Harvard Business Review* 73:120.

Rao P & Holt D (2005) Do green supply chains lead to competitiveness and economic performance? *International Journal of Operations and Production Management* 25:898.

Saling P, *et al.* (2002) Eco-efficiency analysis by BASF : the method. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 7(4):203-218.

Scherpereel C, Van Koppen K, & Heering F (2001) Selecting Environnemntal Performance indicators. *Greener Management International* 9:97-114.

Siracusa G, La Rosa AD, & Sterlini SE (2004) A new methodology to calculate the environmental protection index. A case study applied to a company producing composite materials. *Journal of Environmental Management* 73:275-284.

Soytas U & Sari R (2007) Energy consumption, economic growth, and carbon emissions : challenges faced by an EU candidate member. *Ecological Economics* 68:1667-1675.

Steege P (1996) Overall Equipment Effectiveness in Resist Processing Equipment. *IEEE/SEMI- Advanced Semiconductor Manufacturing Conference*.

Tsoulfas GT & Pappis CP (2008) A model for supply chains environnemntal performance analysis and decision making. *Journal of Cleaner Production*:1647-1657.

Umeda S & Zhang F (2006) Supply chain simulation: generic models and application examples. *Production Planning & Control* 17(2):155-166.

Vachon S & Mao Z (2008) Linking supply chain strenght to sustainable development : a country-level analysis. *Journal of Cleaner Production* 16:1552-1560.

Wacker JG & Sheu C (2006) Effectiveness of manufacturing planning and control systems on manufacturing competitiveness : evidence from global manufacturing data. *International Journal of Production Research* 44(5):1015-1036.

Waterson PE, Clegg C, Bolden R, Pepper K, Warr,P.B., & Wall TD (1999) The use and effectiveness of modern manufacturing practices : a survey of UK industry. *International Journal of Production Research* 37(10):2271-2292.

Wyland WL, Buxton K, & Fuqua B (2000) Simulating the supply chain. in *IEE solutions*, pp 37-42.

III.2.6 Article accepté en juillet 2011 pour un numéro spécial Production Planning and Control

# Carbon friendly supply chains: a simulation study of different scenarios

Anicia Jaegler[a, b,*] and Patrick Burlat[b]

[a] Laboratory for Information Science and Technology, Henri Fayol Institute, Ecole des Mines de Saint-Etienne
[b]Idrac Center of Applied Research, IDRAC International School of Management

Our research focuses on $CO_2$ emissions along supply chains, from freight energy use to inventories storage. These supply chains are Collaborative Network Organizations (CNOs) linking together actors operating along the same value stream. A supply chain model using a discrete event simulation was developed. Our CNO model is able to simulate a three tier supply chain. Four tunable variables are provided: manufacturing capability, locations, mode of transportation and types of products. The product data are from Carrier, a large manufacturer and distributor of heating, ventilating and air conditioning systems. Their purpose is to compare levels of $CO_2$ emitted for differing configurations of different scenarios. Some results are logical but others are unexpected. The principal objectives of this study are twofold: providing a realistic decision support for simulating and promoting sustainable Collaborative Networks (CNs), helping managers to select eco-friendly supply chains.

**Keywords**: green supply chain; carbon emissions; simulation; collaborative network organization; sustainability.

## Introduction

At the outset, in 1995, the IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) report led to the Kyoto protocol. Commitments of the Protocol called for a reduction of greenhouse gas emissions. In 2007, a new IPCC report concluded that the increase of these gases is anthropogenic with a confidence level of 90%. (Soytas and Sari, 2009) indicated that main problem that the world must and will face is global warming caused by increased $CO_2$ emissions.

Industry, as well as other human activities, is involved. Moreover, sustainability is a way in which organizations can distance themselves from the pack, with a resulting improvement in their environmental and social reputations. This also has an advantage in reducing cost or and increasing competitiveness.

In this context, can sustainable success be reached thanks to collaborative structures such as Collaborative Network Organization (CNO) (Camarinha-Matos et al., 2009) ? To address part of this topic, we focus here on a precise mode of CNO: supply chains. Interestingly, the task of comprehensively designing supply chains still lacks many conceptual tools to understand the complex ties between industrial indicators (mostly inventory levels and customer service) balanced by the environmental impacts of meeting their day to day needs.

For instance, Carrier, one of the world's largest manufacturers and distributors of heating, ventilating and air conditioning systems, currently has dealt with the challenging design problem of changing their products in such a way to reduce pollution and increase energy efficiency during use with some success. In 2003, the American Agency for Environmental Protection recognized Carrier as leader in environmental protection. They have continually produced innovative products while working on diminishing water and energy consumption. Currently an ongoing project for Carrier is figuring how to adopt a green supply chain.

This paper studies via simulation how localization of suppliers significantly influences both industrial and environmental performance within a supply chain. Our CNO model consists of three manufacturers operating along the same value stream, and addressing a final market. Different scenarios can be generated to compare carbon emissions of the supply chain. One of our objectives is to determine best practices to balance green performance with supply chain efficiency. To do so, discrete event simulation is used to compare supply chains.

The remainder of this paper is organized as follows: first a brief state of the art explains our research choices. Then a supply chain model and its library of parameters are presented. Next, the configuration and calibration of the simulator are discussed. The experimental approach is explained and the study

case's results are presented. Finally, in the conclusion some perspectives on possible future research are discussed.

**State of the Art**

A Collaborative Network (CN) encompasses a large number of concepts. The diagram of (Camarinha-Matos and Afsarmanesh, 2008) shows the extent.

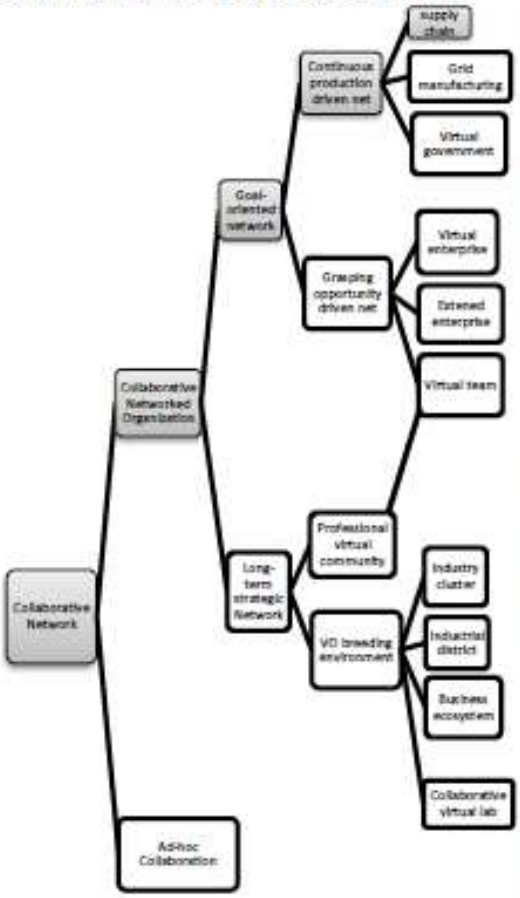



Figure 1. Collaborative Network taxonomy

In our case, we study a supply chain, i.e. a CNO which is goal-oriented with a continuous production.

Due to stricter regulations, as well as encouraged by shareholders and consumers, manufacturers have begun to integrate environmental concerns into their regular practices (Zhu *et al.*, 2008), (Hoffman, 2007) and promote Green Supply Chain Management (Srivastava, 2007). Designing eco-friendly supply chains is crucial because 50% of the industrial added value is now derived from the supply chain (Ciliberti *et al.*, 2008). Several authors have already established a positive link between adopting a greener supply chain, and the subsequent increased competitiveness and improved financial performance (Porter and Linde, 1995), (Klassen and McLaughlin, 1996), (King and Lenox, 2001), (Carter and Rogers, 2008). (Kiernan, 2001), (Rao and Holt, 2005) also found this link but cannot measure its importance. It is interesting to note that within supply chains, transport and storage seem to account for around 50% of the environmental impact (Rizet and Keita, 2005), (Cholette and Venkat, 2009). In addition, two articles indicate that firms can be and should be held responsible for the environmental footprint of their suppliers or partners (Seuring et al., 2008), (Vachon and Mao, 2008). Consequently, a profound study of both the economic and environmental performance of transport and storage along a supply chain seems relevant.

To assess performance, indicators need to be selected. Three attributes to evaluate a lean and green supply chains are typically used: supply chain return on asset (ROA), customer satisfaction and Life Cycle Assessment (LCA) (Kainuma and Tawara, 2006). Within these indicators are financial, customer and environmental perspectives. The first two are more commonly studied in literature (Gunasekaran et al., 2004, Scherpereel et al., 2001). The study of this environmental aspect has only recently been explored. Among the many considerations covered are waste water, air emissions, solid wastes, toxic wastes, local nuisance, energy consumption, water consumption, raw materials and packaging use as examples (Brent and Visser, 2005). While there are many factors, an eco-efficiency analysis conducted by (Saling et al., 2002) tends to prove that energy use, raw material consumption, and emissions are the three principal industrial factors which impact on the environment (approximately 20% each). Furthermore, it should be emphasized that air pollution emission accounts for 50% of all emissions. Based on this, our research will focus on the widespread carbon dioxide equivalent ($CO_2$ eq.) index to assess environmental impacts of supply chains as (Sundarakani et al., 2010). Most studies linking supply chains and sustainability are based on statistical analysis from collected data

(Vachon and Mao, 2008), (Azevedo et al., 2011). (Chan, 2003), (Kannan et al., 2008) automates the steps for analysis. These methods require high quality data and their models are calibrated with average data sets. So using them to design scenarios which differ from set norms is uneasy. These limitations made us choose another methodological approach: discrete-event simulation modelling. One study (Banks, 1998) indicates that an advantage of this method is in the investigation of different and new configurations. Another (Hellström and Johnsson, 2002) add that its capability to create "what if" scenarios makes it a very powerful tool to analyze and design virtual supply chains. Discrete-event simulation allows users to change the settings one by one to assess impacts and to measure the efficiency of the supply chain (Umeda and Zhang, 2006). Three case studies on the distribution of aluminium metal use simulation to generate a green supply chain (Khoo et al., 2001), (Hui et al., 2006) ,(New et al., 2010). However, the area studied is specific. Hui's model was based on ideal conditions and the authors emphasize one perspective for further research was to develop a more realistic model.

Therefore, evaluating supply chains through three indicators chosen (financial, customer satisfaction and environmental) as well as demonstrating the changes of alternative management choices seems particularly relevant. With these aims in mind, we propose a data driven supply chain model to analyze supply chains differing by the effectiveness of the players involved, location, and type of product.

## Supply Chain Conceptual Model

This section begins with a brief visual representation of the modelled supply chain (Figure 2). It is composed of a material sourcing, a supply chain made of three enterprises, and a final customer. The raw material supplier is considered to have an infinite supply of stock. The final customer orders according to a stochastic external daily demand.

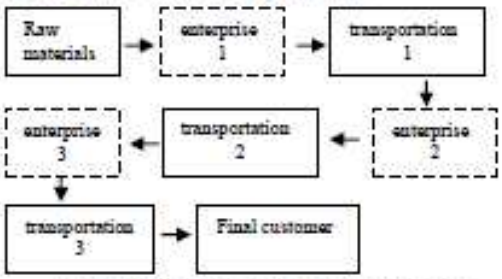



Figure 2. Supply chain conceptual model

Each enterprise is comprised of a reception module and two serial processes, transforming raw material (RM) into semi-finished goods (SFG) and SFG into finished goods (FG) as illustrated in figure 3. These production processes are transfer lines manufacturing on product with two variants so as to require set up within product flow. They are managed with a reorder point (ROP) rule, and synchronized according to a Make to Stock (MTS) policy. Once an order arrives, the inventory level is scanned. If the level is insufficient, a production order is passed; otherwise the order is delivered. In addition, at constant time intervals the inventory level is scanned. If it is below the safety threshold, replenishment is triggered.

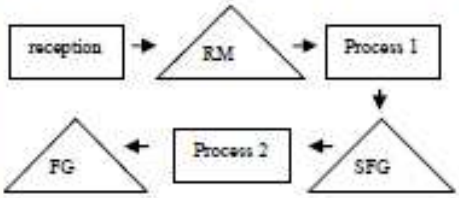



Figure 3. Enterprise module

Between each enterprise, a delivery module will simulate three different types of transportation: air, water and road. Additionally, two types of buffer storage are created (figure 4): one due to delivery time amongst firms (table 2) and one for downstream and upstream inventory buffers that will be sized according to the frequency of delivery (table 2). Finally, a $CO_2$ data collector is attached to all delivery modules (Cholette and Venkat, 2009).

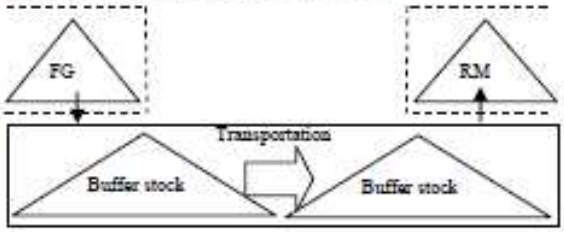



Figure 4. Illustration of the aspects of a delivery module

## Enterprise Library

A library of enterprises has been built to provide instances for the six tiers within the supply chain model (the three manufacturers and the three transporters). The manufacturers have been classified according to four main attributes: Overall Equipment Effectiveness (OEE), location, transportation, and type of product. These four attributes are the inputs of the model; the outputs being the number of kilometers, the number of stocked products and the emissions due to transportation and storage.

### *Overall Equipment Effectiveness*

In real life, manufacturers within the same industrial sector will have diverse effectiveness, depending on their production and organization system. To keep it generic, the model is able to simulate firms with different levels of effectiveness. An Overall Equipment Effectiveness (OEE) metric is used to categorize the manufacturing systems. OEE is composed of three parameters: availability, performance and quality. Availability is measured in amount of downtime. Performance is assessed in losses of speed. Quality is gauged by percentage of defects. Finally, OEE is commonly defined as follows: OEE = Availability × Performance × Quality. The OEE indicator is widespread, easy to calculate for firms and offers a comprehensive evaluation of a production process. In the simulation, OEE is used to assess availability, breakdowns, scrap rates and set up times (table 1).

| effectiveness | A | B | C | D |
|---|---|---|---|---|
| OEE | 85% | 74% | 63% | 44% |
| availability | 90% | 86% | 81% | 72% |
| % breakdown unvailability | 10% | 20% | 30% | 40% |
| % set up unvailability | 10% | 20% | 30% | 40% |
| % other unvailability | 80% | 60% | 40% | 20% |
| performance | 95% | 90% | 86% | 76% |
| quality | 99% | 95% | 90% | 80% |

Table 1 . OEE categories

Many studies have catalogued OEE levels in various industrial sectors (Ahmad and Dhafr, 2002, Leachman R. and Hodges D., 1997, Muchiri and Pintelon, 2008, Steege P., 1996, Wacker and Sheu, 2006, Waterson et al., 1999). The typical benchmarks suggest that the usual OEE ranges anywhere from 45% to 90% in the mechanical industry. We define four classes of OEE : between 90% et 99% for A, 80% and 89% for B, 70% and 79% for C and between 60% and 69% for D. So, in the simulation bench, we calibrated the characteristics of the resources to obtain four different OEE. Then, the sizes of inventories are fine-tuned according to the characteristics of production resources so as meet a 100% customer service rate. For example, high effectiveness company require fewer inventories than low effectiveness company. Initial inventory level is calibrated to limit warm up period (safety threshold plus transport time).
However, the model is still able to simulate different configurations to judge the benefits of selecting nearer but less efficient suppliers, with shorter distances travelled but larger inventories buffers.

### *Shipping, Plant Locations and Types of Products*

Shipment of raw materials, parts, and finished goods from one location to the next in a supply chain happens by train, truck, boat or plane or some combination therein. To calculate the $CO_2$ emissions, we need to model the shipping distance between two companies as well as estimate the weight and bulk of the manufactured product. Transport pollution types and levels are dependent on cargo weight, mode of transportation and distance travelled. Indeed, the unit of the $CO_2$ emissions is calculated in g or kg per $m^2$ or ton-km. Moreover, for the transportation by boat, we need the bulk density in ton/$m^3$.
Initially, plant locations are defined by four areas representing the distance between two successive echelons of the supply chain. Table 2 shows these distances with associated delivery times and the buffer storage due to the duration and frequency of transport.
In the transportation module, for the case of delays, a speedy transportation mode is simulated for both continental and global configurations. Either a standard or express transportation is automatically chosen if the expected delivery date is unattainable (order date plus transport time). Here, discrete event simulation is a relevant tool to dynamically calculate the delays and trigger express transports when necessary, with respect to the manufacturing parameters (set up, breakdowns, scraps items and inventory buffers).

| Configuration Notation | Local l | Regional r | Continental c | Global g |
|---|---|---|---|---|
| Transportation time | 4 | 8 | 40 | 240 |
| Waiting time | 4 | 8 | 20 | 40 |
| For x km | 50 | 500 | 1500 | 8000 |

Table 2. Location specifications

Second, products have been divided into four types according to the following attributes: heavy/light and bulky/small. Configurations 1, 2 and 4 were instanced with actual data from Carrier ; configuration 3 with data from plastics industry.

Table 3 shows the data used in the simulations. The following assumptions based on Carrier data have been defined to calculate product ground clutter. Products 3 and 4 are not stackable. Five meter high storage racks are used. How many products can be stacked at this height are estimated to determine rack shelf surface area needed for one product. In the warehouse, aisles and passages represent 60% of total space. The carbon footprint of construction of an industrial warehouse (including facilities) in terms of kg $CO_2$ equivalent per m² is considered (table 4). Density is necessary to calculate the emissions of the container ship.

| product | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|
| type | thermostat | compressor | SPA | chillers |
| bulky | no | no | yes | yes |
| heavy | no | yes | no | yes |
| Weight in tons | 0.0000055 | 0.2880000 | 0.4500000 | 8.4400000 |
| Total area in m² | 0.000039 | 0.1720000 | 5.060000 | 53.831250 |

Table 3. Product data

For freight energy use, only the weight of the product and the number of kilometers between two firms are used. The French Agency of the Environment and the Energy Mastery (ADEME) provides figures for $CO_2$ emissions per ton-km. They determine an average emission per ton-km from an emission per vehicle.km as well as estimate an average weight of goods transported by a vehicle. Table 4 indicates the amount of $CO_2$ emissions in $gCO_2$ equivalent per ton-km according to the transportation. This process takes into account upstream emissions and combustion gases. For the local locus, trucks are often used; for regional or continental loci truck, for global boat is favored. Worldwide delivery employs container shipping. Urgent shipping requires trucking for short routes and air freight for long distances. As aforementioned, if there are delays, then express transportation is automatically selected in the discrete event simulation model.

| Transportation/ storage | $gCO_2$ equivalent per ton.km Or per m² (uncertainty) |
|---|---|
| Local (l) | 145,10 (10%) |
| Regional (r) ou Continental (c) | 74,90 (10%) |
| Global (g) | |
| Product 1 | 3,57(10%) |
| Product 2 | 42,86(10%) |
| Product 3 | 33,33(10%) |
| Product 4 | 13,64(10%) |
| Express continental | 570 (20%) |
| Express global | 320 (20%) |
| Industrial shed | 75 000 (50%) |

Table 4. g equivalent $CO_2$ due to the transportation and storage according to the location

To explain more fully the figures from table 4 it is important to know that for local transportation, the trucks employed are smaller than for regional or continental shipping, so the $CO_2$ emissions are higher per kg.km. When time is of the essence, planes are used and they emit more $CO_2$ during take-offs and landings than during the flight itself. Therefore, emissions per km are significantly higher for medium haul than long haul.

## Simulation Instance and Calibration

### *Configuring Simulation Choice*

Before the start of the simulation, the supply chain needs to be configured. Selecting a manufacturer type from the library entails (i) opting a locale (l, r, c and g), (ii) choosing an OEE (A, B, C and D), (iii) selecting a type of product (product classes 1, 2, 3 and 4). The type of products is constant along the supply chain. ARENA simulation software is used.

### *Simulation Characteristics*

Carrier final customers demand are aggregated and are modelled with a normal stochastic distribution with average of 50 units, a standard deviation of 5 at an arrival frequency of once a day. Customer requests are directly transformed into delivery orders for finished goods, following a Make To Stock policy. If enough finish goods are already available, then delivery proceeds from stock. Otherwise, a delay for fabrication is recorded for all destinations. If then, the

order date is overdue, an express transportation is configured for continental or global shipping. A buffer stock is calibrated to cover the standard transportation duration and another buffer for the lead-time between two transportation departures.

Production processes, set ups, and changeover times have been modelled using stochastic triangular distributions. Availability is adjusted via breakdowns modelled by exponential functions representing mean times among failures and repairs and set up times. Performance (i.e. losses of speed) is set via tuning machine cadences. All these parameters are fixed to meet target values for effectiveness, and correspond to average measures from our case studies. After having set these variables to profile a manufacturer, command variables such as replenishment reorder points and batch sizes are calibrated. In our approach, the command variables have been set so that the supply chains always meet the final demand without any delay. This means that extra inventory buffers have been sized to compensate for the distance between firms in the case of regional, continental and global locations. This calibration makes it possible to compare supply chains offering identical customers service, and to focus on $CO_2$ emissions.

Five simulation runs of 40 000 hours were performed for each configuration. Simulation campaigns are sufficiently numerous and long-term to overcome the system's transitional phase and seem to take account of most random phenomena.

We simulate configurations with the follow characteristics:

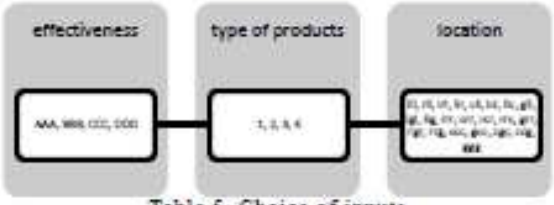



Table 5. Choice of inputs

A further location is introduced in homogenous location configurations. All the combinations led to 352 different configurations. To deal progressively with the problem, our first experiments focused on a range of specific configurations: deteriorated location-AAA with product 1 then deteriorated location-AAA with four types of products then all configurations.

***Twenty two configurations: efficiency AAA, product 1, deteriorated location***

We focus on 22 configurations with high efficiency (AAA) and product 1. We perform a principal component analysis on four criteria: emissions due to storage and transportation (environmental performance), costs due to stored products and number of kilometers (financial performance). The contributions to the axes are the following:

**Simulation results**

| | Axis 1 (92%) | Axis 2 (8%) |
|---|---|---|
| **Positive Contributions** | Emissions due to transportation (27%) and storage (26%) | Costs due to number of km (72%) |
| **Negative Contributions** | | Costs due to number of stocked products (14%), Emissions due to storage (13%) |

Table 6. Contributions to axes

The first axis represents the environmental criteria and the second axis the financial criteria. On these two axes, the projections are on figure 6. As can be expected, the 3 local configuration and its degradations with a regional location (in grey) emit less than the other configurations. Evidently, the 3 global configuration (in dark grey) emits the most. At the opposite, other results require an explanation because they are non trivial. The 3 local configuration degraded with a continental location have the same results than the 3 regional configuration. If we look at the 3 continental configuration, we note that when it is

degraded with a global location the number of kilometers and the emissions increase wherever we place the global degradation. We obtain note the same results with the 3 regional configuration and its degradation with a continental location. Surprisingly, the degradation of 3 local and 3 regional configurations with a global location (dotted) provides an interesting result: the farther upstream the delocalization is in the supply chain the higher the emissions are.

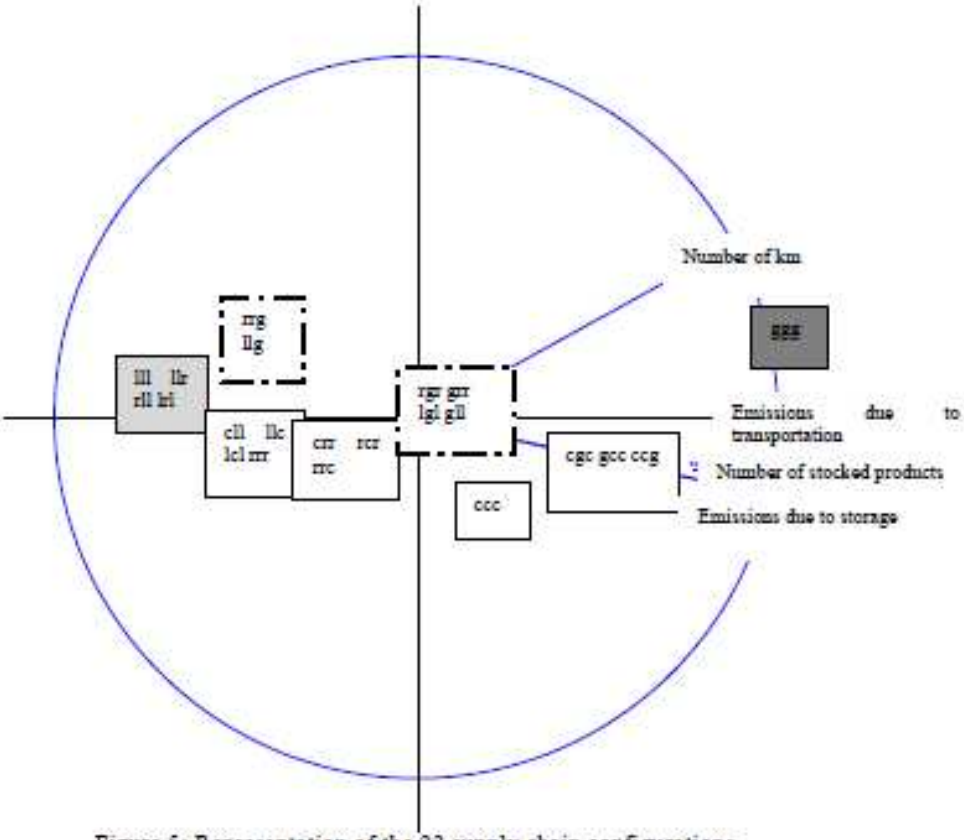



Figure 5: Representation of the 22 supply chain configurations

If we focus on these configurations (dotted), we note that the most decisive criteria of llg and rrg configurations is the number of kilometers. When the global location is downstream of the supply chain the principal parameter is the emissions. We can explain thus as follows. We set a 100% service rate. The inventories and the safety levels are configured accordingly. So the two first tiers require much more express transports than the last tier to meet final demands without delay. When the global location is at the last place inventory management precludes from these transportation. Note that this effect is only visible thanks to the dynamic simulation model. In addition it will be stronger within a longer supply chain.

To go further, the study is now illustrated for a total of 4 products (88 configurations) on figure 6.

***Eighty-eight configurations: efficiency AAA, four products, deteriorated location***

Using same classification, we find that the type of product is very significant: products 1 and 2 always belong to the same class. Then, the more the location is degraded the more the classes will be shifted up and towards the right. The emission results for products 3 and 4 are very high. Another point is to note: product 1 and 2 with 3 continental configuration are in the same class than product 3 and 4 (in grey). This can explain this by the number of kilometers by truck for continental transportation and by boat for global configuration. After all, boats emit less than trucks. The type of product does not compensate for this difference. We analyse the influence of the type of

products in the results as well let's examine the influence of efficiency.

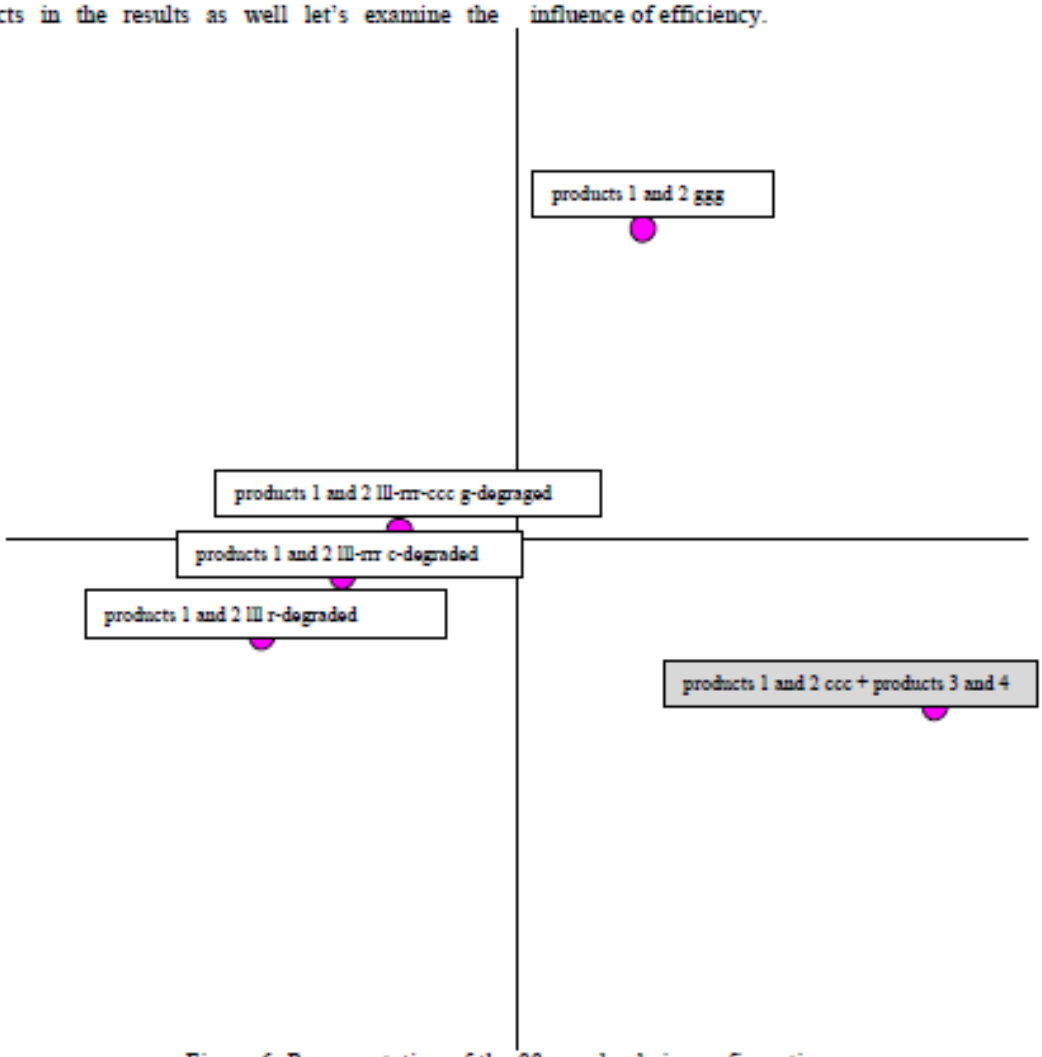



Figure 6. Representation of the 88 supply chain configurations

***Three hundred fifty two configurations: all configurations***

A hierarchical classification has been build to confirm the previous results.

We observe that the effectiveness is less influential than the type of product even if a high efficiency is always preferable. Product 4 emits more than product 3 and products 1 and 2. These products are closer.

We notice that the position of the degraded location change significantly the results. One location g is sufficient while it takes 2c (in grey).

| class | configurations |
|---|---|
| 1 | Products 3+4 |
| | Products 1+2 ccc |
| 2 | Products 1+2 with g in first position or with 2c |
| 3 | Products 1+2 degradation of lll with r or of rrr with c |
| 4 | Products 1+2 ggg |
| 5 | Products 1+2 AAA with g and 2l or g in last position |
| | Products 1+2 DDD with g in second or third position with l or r |

Table 7. Classes

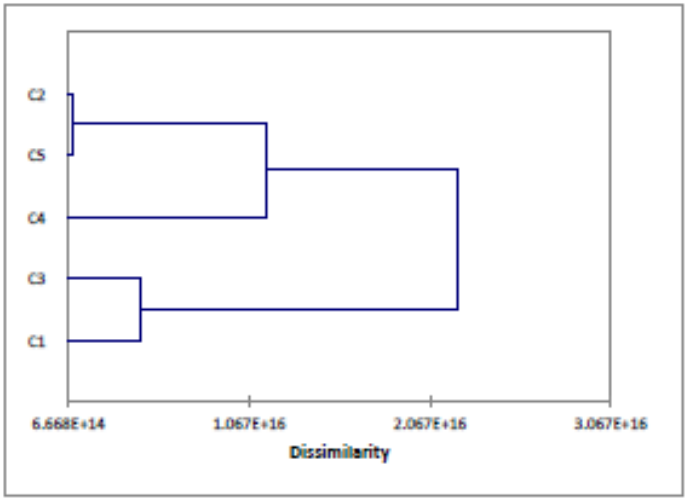



Figure 7. Representation of the 352 supply chain configurations

**Discussion and managerial implications**

Simulation results highlight the following findings: when the supply chain is homogeneous, $CO_2$ emissions logically increase in order 3 local, 3 regional, 3 continental, 3 global. If the supply chain is very heterogeneous (containing local and global locations), then the green performance degrades as the global locations are located further upstream the supply chain. For example, the more distant the location is upstream the more their $CO_2$ emissions increase: llr, llc, llg are emitting less $CO_2$ than lrl, lcl, lgl and than rll, cll, gll.

Moreover, we found that the type of product is more influential than the effectiveness of the enterprise on the results which confirms the findings of a previous study (Jaegler and Burlat, 2010). It is better to choose a homogeneous high effectiveness but its influence will be less as compared to the type of product. Thus, designing light and compact products is the most efficient mean to optimize its green supply chain.

The results provide orientations to enlarge logistics partner selection by considering it within the broader context of environmental performance. Empirical evidences linking the fields of collaborative networks and sustainability have come up. While not obvious at first glance, it is crucial to pay attention to the position of the degraded link in the chain. So collaborating with such degraded links to help them improving effectiveness will be essential for overall green performance of the supply network. Moreover, even if the last two locations are quite close, farther the first producer is from the second enterprise more the emissions increase. Here again, collaboration between tiers will be helpful to build a relevant chain with regards to green criteria. So, beyond financial competition, enterprises within supply networks should collaborate to optimize effectiveness and location of plants with the aim to meet sustainable development. This global supply chain design requires strong collaboration between partners and should be attained within the frame of Collaborative Network Organizations.

**Conclusion and Perspectives**

In this paper, a model of supply network is developed, implemented and assessed with the data of Carrier products. Simulation is used to evaluate a wide variety of virtual supply chain scenarios. This simulation tool has been tested in the case of a supply chain in a Make To Stock environment to produce two flows of products with four types of products and with four locations choices (local, regional, continental and global). Types of products affected the $CO_2$ emissions considerably. Unexpectedly, first tier's locations have significantly influenced simulation results with global locales being the worst choice.

This raises important questions: when the supply chain has heterogeneous efficiency, have we the same conclusion? If the locations are heterogeneous, how do the results change? With companies seeking to outsource production to low wage countries, providing a comprehensive evaluation considering manufacturing efficiency and service rate of suppliers is required. On top of that, what happens if the supply

chain is more complex? Hidden environmental costs and the economic risks of mutable transport energy prices need to be visible to the decision makers. Future work will focus on these factors and questions.

**References**


AHMAD, M. M. & DHAFR, N. 2002. Establishing and improving manufacturing performance measures. *Robotics & Computer-Integrated Manufacturing*, 18, 171.

AZEVEDO, S. G., CARVALHO, H. & MARCHADO, V. C. 2011. The influence of green practices on supply chain performance: A case study approach *Transportation Research Part E*.

BANKS 1998. *Handbook of Simulation : Principles, Methodology, Advances, Applications, and Pratice*, New York, John Wiley.

BRENT, A. C. & VISSER, J. K. 2005. An environmental performance resource impact indicator for life cycle management in the manufacturing industry. *Journal of Cleaner Production*, 13, 557-565.

CAMARINHA-MATOS, L. M. & AFSARMANESH, H. 2008. On reference models for collaborative networked organizations. *International Journal of Production Research*, 46, 2453-2469.

CAMARINHA-MATOS, L. M., AFSARMANESH, H. & MOLINA, A. 2009. Collaborative networked organizations - Concepts and practice in manufacturing enterprises. *Computers & Industrial Engineering*, 57, 46-60.

CARTER, C. R. & ROGERS, D. S. 2008. A framework of sustainable supply chain management: moving toward new theory. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 38, 360-387.

CHAN, F. T. S. 2003. Interactive selection model for supplier selection process: an analytical hierarchy process approach. *International Journal of Production Research*, 41, 3549-3579.

CHOLETTE, S. & VENKAT, K. 2009. The energy and carbon intensity of wine distribution: A study of logistical options for delivering wine to consumers. *Journal of Cleaner Production*, 17, 1401-1413.

CILIBERTI, F., PONTRANDOLFO, P. & SCOZZI, B. 2008. Logistics social responsibility: Standard adoption and practices in Italian companies. *International Journal of Production Economics*, 113, 88-106.

GUNASEKARAN, A., PATEL, C. & MCGAUGHEY, R. E. 2004. A framework for supply chain performance measurement. *International Journal of Production Economics*, 87, 333.

HELLSTRÖM & JOHNSSON. Year. Using discrete-event simulation in supply chain planning. *In:* The 14th Annual Conference for Nordic Researchers in Logistics, 2002.

HOFFMAN, W. 2007. Who's Carbon-Free? *Traffic World*, 271, 15-15.

HUI, SPEDDING T.A., BAINBRIDGE I. & TAPLIN D.M. 2006. Creating a green supply chain : a simulation and a modeling approach. *In:* SPRINGER (ed.) *Greening the supply chain by J. Sarkis*. London.

JAEGLER, A. & BURLAT, P. 2010. Linking Carbon Performance and Effectiveness of Supply Chain. *In:* CAMARINHA-MATOS, L. M., BOUCHER, X. & AFSARMANESH, H. (eds.) *PRO-VE, IFIP AICT 336*. Saint-Etienne.

KAINUMA, Y. & TAWARA, N. 2006. A multiple attribute utility theory approach to lean and green supply chain management. *International Journal of Production Economics*, 101, 99-108.

KANNAN, G., NOORUL HAQ, A., SASIKUMAR, P. & ARUNACHALAM, S. 2008. Analysis and selection of green suppliers using interpretative structural modelling and analytic hierarchy process. *International Journal of Management & Decision Making*, 9, 1-1.

KHOO, SPEDDING, BAINBRIDGE & TAPLIN 2001. Creating a green supply chain. *Greener Management International*.

KIERNAN, M. J. 2001. Eco-Value, Sustainability, and Shareholder Value: Driving Environmental Performance to the Bottom Line. *Environmental Quality Management*, 10, 1-12.

KING & LENOX 2001. Does it really pay to be green? An empirical study of firm environnmental and financial

performance. *The Journal of Industrial Ecology*.

KLASSEN & MCLAUGHLIN 1996. The impact of environmental management on firm performance. *Management Science*, 42, 1199-1214.

LEACHMAN R. & HODGES D. 1997. Benchmarking Semiconductor Manufacturing. *IEEE/IRW Final report.* .

MUCHIRI, P. & PINTELON, L. 2008. Performance measurement using overall equipment effectiveness (OEE): literature review and practical application discussion. *International Journal of Production Research*, 46, 3517-3535.

NEW, E. S., ADHITYA, A., HALIM, I. & SRINIVASAN, R. Year. Grenn supply chain design and operation by integrating LCA and Dynamic simulation *In:* 20th European Symposium on Computer Aided Process Engineering, 2010. Elsevier.

PORTER & LINDE, V. D. 1995. Green and competitive : ending the stalemate. *Harvard Business Review*, 73, 120.

RAO, P. & HOLT, D. 2005. Do green supply chains lead to competitiveness and economic performance? *International Journal of Operations & Production Management*, 25, 898-916.

RIZET, C. & KEÏTA, B. 2005. Chaînes logistiques et consommation d'énergie : cas du yaourt et du jean. *In:* INRETS-DEST (ed.).

SALING, KICHERER A., DITTRICH-KRÄMER B., WITTLINGER R., ZOMBIK W., SCHMIDT I. & AL 2002. Eco-efficience analysis by BASF : the method. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 7, 203-218.

SCHERPEREEL, C., VAN KOPPEN, C. S. A. & HEERING, G. B. F. 2001. Selecting Environmental Performance Indicators. *Greener Management International*, 97.

SEURING, S., SARKIS, J., MÜLLER, M. & RAO, P. 2008. Sustainability and supply chain management – An introduction to the special issue. *Journal of Cleaner Production*, 16, 1545-1551.

SOYTAS, U. & SARI, R. 2009. Energy consumption, economic growth, and carbon emissions: Challenges faced by an EU candidate member. *Ecological Economics*, 68, 1667-1675.

SRIVASTAVA, S. K. 2007. Green supply-chain management: A state-of-the-art literature review. *International Journal of Management Reviews*, 9, 53.

STEEGE P. Year. Overall Equipment Effectiveness in Resist Processing Equipment. *In:* IEEE/SEMI- Advanced Semiconductor Manufacturing Conference, 1996.

SUNDARAKANI, B., DE SOUZA, R., GOH, M., WAGNER, S. M. & MANIKANDAN, S. 2010. Modeling carbon footprints across the supply chain. *International Journal of Production Economics*, In Press, Corrected Proof.

UMEDA, S. & ZHANG, F. 2006. Supply chain simulation: generic models and application examples. *Production Planning & Control*, 17, 155-166.

VACHON, S. & MAO, Z. 2008. Linking supply chain strength to sustainable development: a country-level analysis. *Journal of Cleaner Production*, 16, 1552-1560.

WACKER, J. G. & SHEU, C. 2006. Effectiveness of manufacturing planning and control systems on manufacturing competitiveness: evidence from global manufacturing data. *International Journal of Production Research*, 44, 1015-1036.

WATERSON, P. E., CLEGG, C. W., BOLDEN, R., PEPPER, K., WARR, P. B. & WALL, T. D. 1999. The use and effectiveness of modern manufacturingpractices: a survey of UK industry. *International Journal of Production Research*, 37, 2271.

ZHU, Q., SARKIS, J. & LAI, K.-H. 2008. Confirmation of a measurement model for green supply chain management practices implementation. *International Journal of Production Economics*, 111, 261-273.

École Nationale Supérieure des Mines
de Saint-Étienne

NNT : 2011 – EMSE - 0620

Anicia LAGIER-JAEGLER

# EVALUATING CONCURRENT IMPACTS OF LOCATION, EFFECTIVENESS AND TYPE OF PRODUCTS ON BOTH ENVIRONMENTAL AND FINANCIAL PERFORMANCE OF SUPPLY CHAINS

Speciality : Industrial Engineering and Management Science

Keywords : simulation, carbon emissions, supply chain

Abstract :

Rendering the supply chain more eco-friendly is an innovative idea progressively adopted by industry. Our research focuses on the $CO_2$ emissions along the supply chain due to freight energy use and storage. A supply chain approach by using a discrete event model was developed. Our proposed tool is able to model Re Order Point production management policy (ROP). Moreover, it can consider the main demand response strategy Make To Stock (MTS). Manufacturing capability is also taken into account using an Overall Equipment Effectiveness indicator (OEE). In addition, the location of the firms and their type of products are modeled. Simulations were conducted by varying the manufacturing capacity, the type of product and the firm location in MTS environment and a ROP planning policy. The purpose is to compare supply chain $CO_2$ emissions and financial elements of different configurations. This method is applied to mechanical and plastic industries. The principle objectives of the study are twofold: develop a supply chain simulation benchmark and conduct pertinent experiments to improve green supply chains.

École Nationale Supérieure des Mines
de Saint-Étienne

NNT : 2011 – EMSE - 0620

Anicia LAGIER-JAEGLER

# EVALUATION DES IMPACTS SIMULTANES DE LA LOCALISATION, DE L'EFFICACITE ET DU TYPE DE PRODUITS FABRIQUES SUR LES PERFORMANCES ENVIRONNEMENTALES ET FINANCIERES D'UNE CHAINE LOGISTIQUE

Spécialité: Génie Industriel et Sciences de Gestion

Mots clefs : simulation, émissions de $CO_2$, chaîne logistique

## Résumé :

Les entreprises sont, de plus en plus, poussées à analyser leurs émissions de carbone. Notre recherche s'intéresse donc à celles-ci quand elles sont dues au transport et au stockage le long de la chaîne logistique. Pour ce faire, nous avons développé un modèle utilisant la simulation à événements discrets. L'outil proposé modélise une stratégie de réponse à la demande et coordonne les flux en Make To Stock. Trois paramètres variables sont pris en compte : la performance industrielle avec l'utilisation d'un taux de rendement synthétique, la localisation des entreprises et le type de produits fabriqués. Différents scénarii, à politique industrielle et localisation soit homogène soit dégradée soit quelconque et à type de produits différents sont simulés. L'objectif est de comparer les critères environnementaux (émissions de carbone) mais aussi financiers (niveau de stock, kilométrage) de ces configurations. Cette méthode est appliquée aux secteurs mécanique et plasturgique. Les principaux objectifs de l'étude sont les suivants : développer des références pour la simulation de chaîne logistique et conduire des expériences pertinentes afin d'optimiser les chaînes logistiques vertes.