HAL
open science

Modélisation, simulation et optimisation pour l'éco-fabrication

Hichem Hassine

To cite this version:

Hichem Hassine. Modélisation, simulation et optimisation pour l'éco-fabrication. Génie mécanique [physics.class-ph]. Ecole Centrale Paris; École nationale d'ingénieurs de Sfax (Tunisie), 2015. Français. NNT : 2015ECAP0016 . tel-01158561

HAL Id: tel-01158561

https://theses.hal.science/tel-01158561

Submitted on 1 Jun 2015

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.

THÈSE

Présentée par **HASSINE HICHEM**

Pour l'obtention du

GRADE DE DOCTEUR

École Doctorale : École Centrale Paris (ED287)\ Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax

Spécialité : **Génie Mécanique**

Laboratoire d'accueil : **LISMMA (EA2336)\ LA2MP**

Modélisation, Simulation et Optimisation pour l'Eco-Fabrication

---

Soutenue le : **09/02/2015**

Devant un jury composé de :

M. RIVIERE Alain	**Professeur des Universités**	**SUPMECA**
M. MILLET Dominique	**Professeur des Universités**	**SUPMECA, Toulon**
M. CHEUTET Vincent	**Professeur des Universités**	**INSA, LYON**
M. CHALBI Anis	**Professeur des Universités**	**ENSIT**
M. HADDAR Mohamed	**Professeur des Universités**	**ENIS**
M. LOUATI Jamel	**Professeur des universités**	**ENIS**
M. BELLACICCO Alain	**Professeur Agrégé**	**SUPMECA**
M. BARKALLAH Maher	**Maître Assistant**	**ENIS**

N° 2015ECAP0016

Remerciements

Le travail de recherche exposé dans ce mémoire de thèse a été réalisé en cotutelle entre le Laboratoire de Mécanique, Modélisation et Productique (LA2MP) à l'Ecole Nationale d'Ingénieur de Sfax (ENIS- Tunisie) et le Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes Mécaniques et des Matériaux (LISMMA) à l'institut Supérieur de Mécanique de Paris (SUPMECA-Paris).

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements et toute ma reconnaissance à mes directeurs de thèse Monsieur HADDAR Mohamed , Professeur des universités à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax, et Monsieur RIVIERE Alain , Professeur des universités à l'Institut Supérieur de Mécanique de Paris, pour avoir assuré la direction de mes travaux et pour la qualité de leur encadrement, leurs conseils et la confiance qu'ils m'ont accordée.

Je tiens à exprimer mes remerciements et ma très vive gratitude à mes encadreurs Monsieur BELLACICCO Alain, Professeur Agrégé à l'Institut Supérieur de Mécanique de Paris, et Monsieur LOUATI Jamel Professeur des universités à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax pour leurs conseils scientifiques, leurs encouragement et la confiance qu'ils m'ont accordée ainsi que pour les discussions scientifiques et les échanges qui nous ont permis de mieux appréhender le sujet de la thèse.

Mes vifs remerciements sont adressés à Monsieur BARKALLAH Maher, Maître Assistant à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax, pour son aide et son encadrement.

Je remercie Monsieur CHALBI Anis, Professeur des universités à l'ENSIT, ainsi que Monsieur CHEUTET Vincent, Professeur des universités à l'Institut Nationale des Sciences Appliquées de Lyon, d'avoir accepté de rapporter mon mémoire et pour l'intérêt qu'ils ont bien voulu porter à ce travail.

Mes remerciements s'adressent également à Monsieur MILLET Dominique, Professeur des universités à l'Institut Supérieur de Mécanique de Toulon, pour avoir accepté de prendre part au jury.

Mes sincères remerciements s'adressent à tous les membres de LA2MP et de LISMMA et à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à achever ce travail.

Finalement, je tiens à remercier du fond du cœur ma famille sans qui je ne serais jamais arrivé là.

Table des matières

Introduction Générale et Problématique 1

Chapitre 1 : Etude Bibliographique 4

Introduction 4

1. Durabilité et notion de développement durable 4

2. Changement Climatique et enjeux environnemental 6

2.1. Effet de serre 6

2.2. Epuisement des ressources 8

3. Eco-conception et Analyse de cycle de vie 9

3.1. Eco-conception 9

3.2. Niveaux d'éco-conception 10

3.3. Réglementations et normalisation 11

3.3.1. La Politique Intégrée des Produits (PIP) 11

3.3.2. La directive RoHS 12

3.3.3. La directive EuP : Eco-conception des produits consommateurs d'énergies 13

3.3.4. Norme d'Eco-conception : NF E 01-005 13

3.4. Outils d'éco-conception 13

3.4.1. Outils d'évaluation environnementale 15

3.4.2. Outils d'amélioration environnementale 16

3.5. Analyse du cycle de vie (ACV) 16

3.5.1. Histoire d'ACV 16

3.5.2. Présentation de l'ACV 17

3.6. Méthodes d'évaluation des impacts environnementaux 19

3.7. Logiciels Pour ACV 21

3.7. Démarches d'intégration de l'Eco-conception 22

4. **Eco-fabrication et fabrication durable** 23

4.1. Modélisation de l'éco-fabrication à base des processus 23

4.2. Modélisation de l'éco-fabrication à base énergétique 26

4.3. Modélisation de l'éco-fabrication à base de la consommation des ressources 30

4.4. Notion de la fabrication à basse émission de carbone (LCM) 31

5. Les techniques et méthodes d'optimisation……..……..35

5.1. Les méthodes déterministes……..……....36

5.1.1. Les méthodes de gradient……..……36

5.1.2. La méthode de Newton…….…….37

5.2. Les méthodes stochastiques……..37

5.2.1. Les algorithmes génétiques……...…….38

5.2.2. La méthode de recuit simulé……..41

5.2.3. La méthode de Recherche Tabou…….……42

5.2.4. Optimisation par Colonie de Fourmis……..43

5.2.5. Les essaims particulaires…….……..44

Conclusion 46

Chapitre 2 : Approche Process pour la modélisation de l'éco-fabrication ... 48

Introduction 48

1. Cadre général de la modélisation de l'éco-fabrication 48

2. Aide à la décision multi critères 50

2.1. Définition 50

2.2. Les types des problématiques de décision 51

2.3. Méthodes d'aide à la décision multi critères 51

2.4. Procédure de choix d'une méthode d'aide à la décision 52

2.4.1. Caractérisation des inputs 54

2.4.2. Caractérisation des outputs 55

2.5. Aide à la décision pour l'éco-fabrication 55

2.5.1. Choix des impacts environnementaux à quantifier 56

2.5.2. Choix du scénario de fabrication 56

3. **Approche process pour la modélisation de l'Eco-fabrication** 56

3.1. Chaîne de production et unité fonctionnelle 57

3.2. Inventaire du cycle de vie 58

3.3. Choix des critères environnementaux 58

3.3.1. Principe 59

3.3.2. Méthodologie d'aide à la décision 60

3.4. Evaluation des impacts environnementaux 62

3.5. Aide à la décision multicritère 62

3.5.1. Mise en place de la méthode PROMETHE I 63

3.5.2. Problématique de pondération en éco-fabrication 64
4. Etude de cas : Production d'acide phosphorique 64
4.1. Chaîne de Production de l'acide Phosphorique 64
4.1.1. Préparation du soufre liquide 65
4.1.2. Préparation de l'acide sulfurique 65
4.1.3. Fabrication de l'acide phosphorique 68
4.2. Inventaire de flux entrés/sorties 70
4.3.1. Représentation en arborescence : 72
4.4. Résultats de la modélisation à l'aide de la méthode CML : 73
4.4.1. Caractérisation des impacts de la chaîne 73
4.4.2. Comparaison des émissions : (Normalisation) 74
4.4.5. Acidification 75
4.4.6. Le potentiel d'épuisement des ressources ADP 76
4.4.7. Le potentiel de réchauffement climatique GWP 77
4.5. Aide à la décision 78
4.5.1. Mise en situation 78
4.5.2. Application pour le GCT 78
4.5.3. Etude d'aide à la décision écologique avec agrégation spécifique 82
Conclusion 85
Chapitre 3 : Approche produit pour la modélisation de l'éco-fabrication ... 87
Introduction 87
1. 'Approche produit' pour la modélisation de l'Eco-fabrication 87
2. Optimisation multi objectifs 91
2.1. Optimisation pour l'éco-fabrication 91
2.2. Méthodologie et outils d'optimisation multi objectifs 93
2.3. Optimisation par Essaim Particulaire 95
2.3.1. Présentation de l'OEP 95
2.3.2. Notion de voisinage : 96
2.3.3. L'OEP pour l'optimisation continue 97
2.3.4. Mise en œuvre de l'OEP pour l'éco-fabrication 98
2.3.5. Approches des poids d'agrégation 99
2.4. Les Algorithmes génétiques 99
2.4.1. Principe méthodologique 99
2.4.2. Paramètres d'un AG 100

2.4.3. Les AG pour l'optimisation multi objectifs 100
3. Modélisation de la consommation des ressources 106
3.1. Input-Process-Output (IPO) 106
3.2. Stratégie d'amélioration de la consommation des ressources à base d'IPO 110
3.3. Le bilan des émissions 110
4. Choix des outils et description de l'approche globale 111
Conclusion 111
Chapitre 4 : Etudes de cas 114
Introduction 114
1. Etude de cas 1 : Pièce de tournage 114
1.1. Temps de Production : 114
1.2. Coût de Production : 115
1.3. Emission environnementale : 115
1.4. Les limitations : 116
1.4.1. Limitation de la puissance de coupe : 116
1.4.2. Limitation d'efforts-couple admissible sur la broche : 117
1.4.3. Limitation liée à l'outil : 117
1.4.4. Limitation liée à la pièce à usiner : 117
1.5. Données de simulation 117
1.6. Résultats 117
1.6.1. Evaluation des paramètres de coupe 118
1.6.2. Evolution des fonctions objectives 118
1.6.3. Influence de la profondeur de passe 120
1.6.4. Comparaison avec les algorithmes génétique 121
2. Etude de cas 2 : Pièce de fraisage 121
2.1. Les fonctions objectives 122
2.1.1. Temps de production 122
2.1.2. Le coût de production 122
2.1.3. L'empreinte écologique 123
2.1.4. La qualité de surface 123
2.2. Les contraintes de production 123
2.2.1. Limitation liée à l'effort de coupe 123
2.2.2. Limitation liée à la puissance de coupe 124
2.2.3. Limitation liée à la résistance pratique à la rupture 124

2.2.4. Limitation sur la résistance à la déformation de l'outil de coupe 124
2.3. Données de simulation 125
Tableau 4.4. Données de simulation 125
2.4. Formulation du problème 125
2.5. Résultats et discussion 126
2.5.1. Evaluation des paramètres de coupe 126
2.5.2. Evolution des objectives de l'optimisation 127
3. Etude de cas : unité de production de l'acide sulfurique 128
3.1. Présentation de l'unité d'acide sulfurique 129
3.2. Modélisation de la phase de combustion 130
3.2.1. Chaleur dégagé Q 130
3.2.3. Bilan enthalpique à l'entré du four : 132
3.2.4. Bilan enthalpique à la sortie du four : 132
3.2.5. Bilan enthalpique global 133
3.2.6. Fonction Economique pour l'exploitation du four de combustion 133
3.3. Modélisation de la chaudière de récupération 133
3.3.1. Bilan Enthalpique 134
3.3.2. Fonction Economique 135
3.4. Modélisation de la phase de conversion 135
3.4.1. 1er Lit de conversion : 135
3.4.2. 2ème lit de conversion 136
3.4.3. 3ème Lit de conversion 137
3.5. Formulation de la problématique d'optimisation 137
3.5.1. Fonctions Objectives 137
3.5.2. Fonctions Economiques 138
3.5.3. Fonctions Ecologiques 138
3.5.4. Contraintes techniques 138
3.5.5. Intervalles pour les variables de décision 138
3.6. Résultats de simulation 139
3.7. Discussion 141
3.8. Influence de l'optimisation du processus sur les éléments auxiliaires de refroidissement 126
3.8. Surchauffeur 141
3.8.1. Echangeur gaz-gaz chaud côté calandre 141

3.8.2. Echangeur gaz-gaz froid côté calandre 143
3.8.3. Economiseur intermédiaire 144
3.8.4. Echangeur GGF côté tubes 144
3.8.5. Echangeur GGC côté calandre 145
3.8.6. Discussion 145
Conclusion générale et perspectives 148

Liste des figures

Chapitre 1

Figure 1.1. Les piliers du développement durable……..…….……..…….5
Figure 1.2. Répartition des émissions de GES par secteur en France….……..……..……...6
Figure 1.3. Les niveaux d'éco-conception (Brezet, 97)…….…….……... 8
Figure 1.4. Les phases pivots d'éco-conception (Pochat, 2005)……...……..…… 12
Figure 1.5. Répartition des outils d'éco-conception…….…….…….…....13
Figure 1.6. Les phases du cycle de vie…….…….…16
Figure 1.7. Les étapes d'analyse de cycle de vie (norme ISO 14040)…..……..……..17
Figure 1.8. Catégorie d'impacts environnementaux…….……..….…18
Figure 1.9. Répartition des logiciels d'analyse de cycle de vie……..…….……19
Figure 1.10. Evolution et développement de l'Eco-fabrication……..…..21
Figure 1.11. Concept du 6R (Jaafar. IH et al, 2007)…….....22
Figure 1.12. Optimisation de la planification des process de production à base d'évaluation de durabilité (Tan et al, 2009)……..…….….……23
Figure 1.13. Besoin en électricité pour les procédés de fabrication (Gutowski, 2001)……...24
Figure 1.14. Comparaison des différents procédés (Kopac J, 2009)……....26
Figure 1.15. Comparaison du coût de production et du temps de production …….....27
Figure 1.16. Répartition de la consommation d'énergie par secteur en Royaume Uni (BEER 2009)…….……27
Figure 1.17. Demande en énergie…….....28
Figure 1.18. Consommation d'énergie pour plusieurs machines de fraisage (Dahmus et Gutowski 2004)…….....29
Figure 1.19. Suivie de la consommation d'énergie par mode de production (Devoldere et al, 2007)…….30
Figure 1.20. Collection des énergies à base du modèle EPE (Seow. Y et al 2011)……...…...31
Figure 1.21. Ratios d'efficacité énergétique des process…….….31
Figure 1.22. Modèle conceptuel pour la fabrication à zero carbone (BALL 2009)…….….33
Figure 1.23. Les entrés sorties d'énergie et matériaux d'un processus de fabrication (Gutowski2006)……..……..34

Figure 1.24. Cycle de vie des produits à base de la plateforme EU-LCA (Heilala 2008)..…..35
Figure.1.25. Algorithme génétique……..…….39
Figure.1.26. Opération de croisement……...……40
Figure.1.27. Opération de mutation……..40
Figure.1.28. Opération de codage……40
Figure.1.29. Algorithme de recuit simulé……42
Figure.1.30. Algorithme de la Recherche Tabou…….……43
Figure.1.31. Stratégie de déplacement d'une particule au niveau des essaims particulaires…45

Chapitre 2

Figure 2.1. Algorithme générale de la modélisation d'éco-fabrication……...…49
Figure 2.2. Processus d'aide à la décision (Guitouni et al 1999)……..……....51
Figure 2.3. Algorithme de l'approche process pour l'éco-fabrication……..…....57
Figure 2.4. Frontières et processus élémentaires d'un système de fabrication…….…....59
Figure 2.5. Eléments de décision pour le décideur...……...….60
Figure 2.6. Des substances contributives à un (ou des) effet sur l'environnement vers la caractérisation des impacts (Princaud.M, 2011)……...…63
Figure 2.7. Chaîne de production de l'acide phosphorique…….……65
Figure 2.8. Unité de préparation d'acide sulfurique…….…67
Figure 2.9. Unité de fabrication de l'acide phosphorique……...….69
Figure 2.10. Processus de filtration de l'acide phosphorique……..…..……..……..…70
Figure 2.11. Etapes de la phase de concentration…….…71
Figure 2.12. Modélisation des étapes de la chaîne de fabrication d'acide phosphorique…….71
Figure 2.13. Modélisation en arborescence de la chaîne de production de l'acide phosphorique…….……73
Figure 2.14. Répartition de l'émission environnementale……...…….75
Figure 2.15. Normalisation des impacts environnementaux…….……75
Figure 2.16. Potentiel d'écotoxicité aquatique marine……..76
Figure 2.17. Potentiel d'écotoxicité aquatique de l'eau……...……77
Figure 2.18. Potentiel d'acidification……...……77
Figure 2.19. Potentiel d'épuisement des ressources……78

Figure 2.20. Potentiel de réchauffement climatique…….……78
Figure 2.21. Répartition des poids des critères pour les différents scénarios…….…….…80
Figure 2.22. Résultats de surclassement des scénarios……..…..…….…….81
Figure 2.23. Représentation géométrique des alternatives et des critères……82
Figure 2.24. Répartition des poids des critères pour les différents scénarios……..……84
Figure 2.25. Influence du changement des poids……..84
Figure 2.26. Classement partiel des scénarios de production…….……..85

Chapitre 3

Figure 3.1. Approche Produit pour la modélisation d'éco-fabrication…….……88
Figure 3.2. Les niveaux de modélisation pour l'approche produit…….……..89
Figure 3.3. Notion de voisinage…….…..……96
Figure 3.4. Algorithme OEP……...…….……97
Figure 3.5. Algorithme de base des AG……..……100
Figure 3.6. Algorithme NSGA II……...……....……104
Figure 3.7. Processus de choix d'une méthode d'optimisation……..…106

Chapitre 4

Figure 4.1. Evolution des paramètres de coupes…….…….……...119
Figure 4.2. Optimisation du coût de production……...……..119
Figure 4.3. Optimisation du temps de production…….…….…..…120
Figure 4.4. Evolution de la consommation d'énergie…….……120
Figure 4.5. Influence de la profondeur de passe…….……121
Figure 4.6. Evolution de la profondeur de passe……...……..…..…..127
Figure 4.7. Evolution du coût de la production……..……127
Figure 4.8. Evolution de l'empreinte carbone……128
Figure 4.9. Evolution du temps de la production……128
Figure 4.10. Evolution de la rugosité……..129
Figure 4.11. Unité d'acide sulfurique……130
Figure 4.12. Four de combustion du soufre liquide……131
Figure 4.13. Evolution du taux de dioxyde de soufre……140
Figure 4.14. Evolution de la température à la sortie du four……...140

Figure 4.15. Evolution de la température à la sortie du 1er lit de conversion…….141
Figure 4.16. Evolution de la température à la sortie du 2ème lit de conversion……...141
Figure 4.17. Evolution de la température à la sortie du 3ème lit de conversion……...142

Liste des tableaux

Chapitre 2

Tableau 2.1. Classification des MADMC selon la matrice inputs/outputs (Hammami A. 2003)…….53
Tableau 2.2. Caractérisation des inputs (Hammami. A, 2003)……...….….54
Tableau 2.3. Caractérisation des outputs (Hammami. A, 2003)……...…55
Tableau 2.4. Quantification des émissions à l'aide de la méthode CML..……..…….……74
Tableau 2.5. Modélisation de l'aide à la décision pour l'usine de fabrication de l'acide phosphorique……..…….……..80
Tableau 2.6. Méthodologie de calcul des poids des critères……...……..83
Tableau 2.7. Modélisation de l'aide à la décision…….…83

Chapitre 4

Tableau 4.1. Données de simulation…….……...……..118
Tableau 4.2. Résultats de simulation pour différents profondeurs de passe…….…..120
Tableau 4.3. Résultats de simulation avec EP et AG…...…….…..……122
Tableau 4.4. Données de simulation…….……..126
Tableau 4.5. Bilan enthalpique à l'entré du four…….…….……..132
Tableau 4.6. Bilan enthalpique à la sortie du four…….……133
Tableau 4.7. Enthalpie des gaz à l'entrée du premier lit…….……135
Tableau 4.8. Comparaison entre l'état réel et les résultats d'optimisation…….……142
Tableau 4.9. Enthalpie des gaz à la sortie de surchauffeur…….……143
Tableau 4.10. Enthalpie des gaz à la sortie de l'échangeur GGC côté tubes…….…….144
Tableau 4.11. Enthalpie des gaz à la sortie de l'échangeur GGF côté calandre…….....144
Tableau 4.12. Enthalpie des gaz à la sortie de l'économiseur intermédiaire…….…….145
Tableau 4.13. Enthalpie des gaz à la sortie de la tour intermédiaire…….…..146
Tableau 4.14. Enthalpie des gaz à la sortie de l'échangeur GGF côté calandre…….…....147

Liste des acronymes utilisés dans le texte, et Signification

ACV : Analyse du Cycle de Vie
ADEME : Agence de l'Environnement et de Maîtrise de l'Energie
ADP : Abiotic Depletion Potential (Potentiel d'épuisement des ressources)
AFNOR : Association Française de NORmalisation
AMDEC: Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité
AP : Acidification Potential
ARPE: Analyse des Ressources et du Profil Environnemental
ATEP : Analyse Typologique Environnementale des Produits
BE: Bureau d'Etudes
BOM: Bilan matériel
CIRAIG: Centre Interuniversitaire de Référence sur l'Analyse, l'Interprétation et la Gestion du cycle de vie des produits, procédés et services
CML : Centre of Environmental science- Leiden University
DEEE : Déchets des Equipements Electriques et Electroniques (*WEEE*)
EP : Eutrophication Potential
EPA: Environmental Protection Agency
EPE: Embodied Product Energy
ESQCV: Evaluation Simplifiée Qualitative du Cycle de Vie
EuP: Energy Using Products
EVAMIX: EVAluation of MIXed data
FAETP: Fresch water aquatic eco-toxicity Potential
GAIA: Geometrical Analysis for Interactive Assistance
GES: Gaz à Effet de Serre
GWP : Global Warming Potential
HQE : Haute Qualité Environnementale
HTP : Human Toxicity Potential
ICV: Inventaire du Cycle de Vie
ISO: International Organization for Standardization
LCM: Low Carbon Manufacturing
MADMC: Méthodes d'Aide à la Décision Multi Critères
MAETP: Marine Aquatique Eco-Toxicity Potential
MAIECO: Méthode d'Apprentissage organisationnel pour l'Intégration de l'Eco-Conception
MAVT: Multi Attribute Value Theory
MAUT: Multi Attribute Utility Theory
PIP : Politique Intégrée de Produits (*IPP*)
PNUE: Programme des Nations Unies pour l'Environnement
POCP: Photochemical Ozone Creation Potential
PROMETHEE: Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluation
QFDE: Quality Function Deployment for Environment

SETAC: Société de Toxicologie et Chimie Environnementales
SPOLD: Society for the Promotion of Life cycle Development
TETP: Terrestic eco-toxicity potential
UNEP: United Nations Environmental Programme
VHU : Véhicules Hors d'Usage (*EoLV*)
WWF: World Wildlife Fund for Nature

Introduction Générale et Problématique

Le XIXème siècle se révèle être le siècle de la révolution industrielle qui a introduit une croissance essentiellement économique. Le principal critère aisément mesurable est représenté par le produit intérieur brut. L'origine de ce critère remonte aux années 1930 et il est souvent vu comme l'indicateur de la richesse d'un pays. Pendant la deuxième moitié du XXème siècle un bon nombre de corrections a été élaboré sur le plan social avec d'importantes avancées sociales. Dés lors, l'expression « économique et sociale » est utilisée dans le vocabulaire courant.

Mais les chocs pétroliers de 1973 et 1979 ont révélé aux pays développés que la base de leur prospérité matérielle était l'utilisation intensive de ressources naturelles finies, et que, outre l'économique et le social, un troisième aspect avait été négligé : l'aspect environnemental.

Certains chercheurs soutiennent l'idée que le modèle de développement industriel n'est pas soutenable sur le plan environnemental car il ne permet pas un « développement » durable.

Les points cruciaux en faveur de cette affirmation sont l'épuisement des ressources naturelles (matières premières, énergies fossiles pour les humains), la pénurie des ressources en eau douce susceptible d'affecter l'agriculture, la destruction et la fragmentation des écosystèmes, notamment la déforestation qui se manifeste par la destruction des forêts tropicales (forêt amazonienne, forêt du bassin du Congo, forêt indonésienne), ainsi que la diminution de la biodiversité qui diminue la résilience de la planète ou encore le changement climatique dû aux émissions de gaz à effet de serre et de manière générale la pollution due aux activités humaines. Les catastrophes industrielles de ces quarante dernières années (Seveso (1976), Bhopal (1984), Tchernobyl (1986),Exxon Valdez (1989), etc.) ont attiré l'attention de l'opinion publique et les associations telles que le WWF, les Amis de la Terre ou encore Greenpeace (Voir aussi Chronologie de l'écologisme).

En faisant le défi du « tout technologique » dans l'optimisation de la consommation énergétique et la lutte contre le changement climatique, notre civilisation recourt de façon accrue aux métaux que nous ne savons pas bien recycler. La déplétion de ces ressources pourrait devenir un enjeu mondial au même titre que la déplétion du pétrole.

Suite à cette prise de conscience de l'importance d'un changement global dans le mode de développement mondial, le rapport de Bruntland défini le développement durable comme suit : « c'est un mode de développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs ».

Ainsi, le secteur industriel représente l'un des éléments clés pour achever les objectifs de ce mode de développement. De ce fait, l'éco-conception a été l'un des premiers pas dans ce secteur. Elle représente un processus permettant aux entreprises industrielles d'assumer leur

responsabilité relative aux impacts générés par leurs produits. Les contraintes liées aux impacts environnementaux sont intégrées dans les stades avancés de la conception.

La notion d'éco-conception est basée sur la notion du cycle de vie d'un produit. Donc, l'intégration de l'écologie doit être introduite dans les différentes phases de ce cycle de vie.

Parmi ces phases, on distingue la phase de fabrication. Cette phase de transformation de produit représente la phase la plus génératrice des émissions néfastes. Ce caractère est dû aux procédés, matériaux ainsi qu'aux énergies utilisées.

La fabrication est l'un des problèmes complexes à étudier dans le cycle de vie du produit. Ce caractère est dû à l'aspect multi objectifs de cette phase ainsi que son étude paramétrique à caractère délicat.

La maîtrise de la dimension écologique de la fabrication a constitué le point de départ pour la mise en évidence du terme 'Eco-fabrication'. Cette dernière est basée essentiellement sur la maîtrise de trois piliers importants : le process, les matériaux et l'énergie.

Ce travail de thèse entre dans le cadre de la proposition d'une approche d'étude globale de l'éco-fabrication. Cette approche constitue une démarche permettant la maîtrise de la phase de fabrication en couplant l'écologie et l'économie en respectant la faisabilité technique.

Le travail de recherche effectué est présenté sous forme de quatre chapitres.

Dans le premier chapitre nous avons développé une étude bibliographique mettant en œuvre les différentes spécificités des notions suivantes : développement durable, éco-conception et éco-fabrication. La première partie de ce chapitre est consacré pour la présentation des piliers du développement durable ainsi que l'histoire de cette notion. Cette partie se termine par les différents points et consignes prise par les différents pays unis pour la protection de l'environnement. La deuxième partie est dédiée à la présentation des efforts et travaux préparés dans le cadre de l'éco-conception. Dans cette partie, nous avons commencé par présenter la mise en place de l'éco-conception dans les usines. Ensuite, on présente la notion d'analyse de cycle de vie qui représente la notion clé au niveau de l'intégration de l'aspect écologique dans la phase de conception. Finalement, les différents logiciels, outils et réglementations ont été présentés. Ces études développées ont été à l'origine de la naissance de la notion de l'éco-fabrication. Cette dernière a été le sujet de la dernière partie de ce chapitre. Les outils de modélisation ainsi que les différentes approches et leur application ont été présentés. Dans ce sens, la fabrication à zéro émission de carbone (LCM) a été la dernière partie étudiée.

Le deuxième et le troisième chapitre sont consacrés pour la présentation des différentes approches et outils développés pour résoudre le problème étudié. D'une part, le deuxième chapitre traite une approche orientée process basée sur l'aide à la décision. Cette approche traite la mise en place de l'aide à la décision multi critères pour la modélisation de l'éco-fabrication. Ces outils ont été introduits en deux phases clés de l'éco-fabrication qui sont : le choix des indicateurs environnementaux à quantifier ainsi que le choix et la comparaison entre les différents scénarios possibles de production. Selon les entrés-sorties ainsi que les objectifs

visés dans le problème à étudier, deux différentes méthodes d'aide à la décision ont été introduites dans cette approche : la méthode Evamix et la méthode Promethee. Pour la mise en place pratique de cette approche, une étude de cas a été développée dans le cadre de la modélisation et la simulation de la chaîne de production de l'acide phosphorique. Trois scénarios possibles pour l'usine ont été étudiés pour le choix final du scénario de fabrication en préparant en parallèle les résultats du comportement écologique de chacun d'entre eux.

D'autre part, le troisième chapitre mis en place une démarche orientée produit ayant comme objectif la résolution du problème multi objectif ainsi que la consommation des ressources le long de la fabrication du produit. Cette approche est basée sur le couplage entre les objectifs écologiques et économiques dans le cadre d'une optimisation multi objectifs. Cette dernière est basée sur l'application des essaims particulaires comme algorithme d'optimisation ainsi qu'une résolution possible du problème d'agrégation des différents objectifs étudiés. Ainsi, un niveau important de cette approche est la modélisation de la consommation des ressources. Ce niveau est à base des modèles input-process-output (IPO) permettant de résoudre le problème de la double quantification au niveau de l'inventaire de préparation des données du système étudié.

Le quatrième chapitre présente les différentes études de cas développées pour la caractérisation des différentes approches. Trois cas d'étude dans le cadre de cette thèse sont présentés le long de ce chapitre. Les deux premiers traitent le cas d'usinage et l'influence de l'intégration de l'aspect écologique au niveau de la phase d'étude d'optimisation des opérations de tournage et fraisage. Pour le dernier cas d'étude, l'amélioration de l'unité d'acide sulfurique a été l'objectif principal. L'application de la deuxième approche pour cette unité a abouti à une augmentation du rendement de la conversion ainsi que la maîtrise de la loi d'entrées-sorties pour les différents équipements de l'installation étudiée.

Chapitre 1 : Etude Bibliographique

Introduction

De nos jours, on assiste à une explosion démographique très importante. Cela n'est pas sans conséquence pour notre planète. Les sociétés qui peuplent la Terre jouissent de la vie sans se soucier de l'état de l'environnement : consommer toujours plus, c'est piller toujours plus les ressources naturelles que la planète a mis des millions d'années à créer (air, eau, océans, forêts, terres cultivables, biodiversité, pétrole), rejeter toujours plus de pollutions et de déchets dans l'environnement, qui commence à être saturé.
Cette façon d'agir conduit la Terre vers une catastrophe en raison de la surexploitation des ressources. L'homme est en train de se suicider inconsciemment par ses propres agissements. Cette situation s'aggrave de plus en plus : si à l'heure actuelle la terre est peuplée de 6 milliards d'habitants, en 2050 nous serons 3 milliards de plus.
Aujourd'hui, la grande majorité de l'humanité souffre toujours de la pauvreté. Des millions de femmes, d'hommes et d'enfants n'ont ni eau potable, ni électricité, ni éducation, ni assez à manger… Mais si tous les habitants de la terre vivaient dans la même situation, il faudrait deux planètes supplémentaires pour satisfaire leurs besoins !
Or, nous n'avons pas d'autre planète. Alors, comment améliorer les conditions de vie de tous les citoyens du monde sans épuiser définitivement la Terre ? Comment satisfaire les besoins des hommes d'aujourd'hui tout en léguant la Terre en bon état ?
En économisant de manière équitable les ressources, en exploitant les technologies qui polluent moins, qui gaspillent moins d'eau et moins d'énergie, et surtout en changeant nos habitudes de consommation et nos comportements. C'est cela, le développement durable. Ce n'est pas un retour en arrière, mais un progrès pour l'humanité : celui de consommer non pas moins, mais mieux. Il est devenu urgent d'agir.
Nos travaux de recherches s'intègrent dans le cadre de l'amélioration du comportement écologique des industries manufacturières. Notre contribution est au niveau de la phase de fabrication : la mise en place d'une démarche permettant la modélisation et l'optimisation pour l'écofabrication.
Dans ce chapitre, on présente un état de l'art sur les travaux concernant l'écoconception ainsi que l'écofabrication. Ces deux concepts représentent deux éléments de base dans le secteur manufacturé permettant d'introduire les principes du développement durable.

1. Durabilité et notion de développement durable

En 1987, la commission de BRUNTLAND a défini pour la première fois la notion du développement durable comme étant « un mode de développement répondant aux besoins actuels sans compromission des possibilités pour les générations futures à répondre à leurs propres besoins ».

Cette notion de développement durable a mis en œuvre trois piliers pour introduire le développement durable qui sont : l'environnement, l'économie et le pilier social. Alors, la durabilité n'est qu'un équilibre entre ces trois composants.

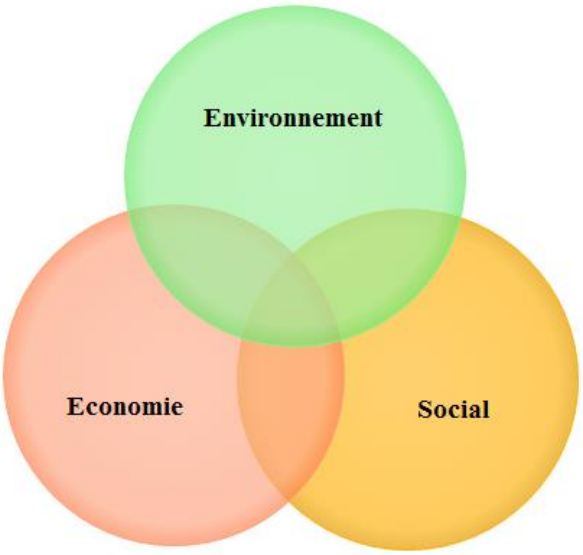


Figure 1.1. *Les piliers du développement durable (DD)*

Ainsi, certains travaux ont été développés pour la mise en place d'une démarche permettant la progression dans le projet de durabilité. En 1992, lors de la conférence de RIO, la communauté internationale a reconnu le DD comme étant un objectif à suivre à l'aide de la création de l'agenda 21 (UNCED 1992). Cette dernière tend à la mise en place d'un partenariat entre les différentes nations pour unifier les objectifs du DD en se référant à une gestion équilibrée : environnement /économie.

En 1997, le Protocole de Kyoto a décidé d'adapter des objectifs pour chaque pays dans le but de réduire les gaz à effet de serre. Ces derniers ont été fixés par les 182 pays participants : CO_2, N_2O, CH_4, PFC, SF_6, HFC.

Suite à ce protocole, les participants ont été sensibilisés pour l'ajout de la dimension environnementale, mais les stratégies ont été encore non développées.

C'est dans ce sens que l'organisation du sommet mondial sur le développement durable tenue par l'ONU a été intégrée (Johannesburg, août/septembre 2002). Suite à ce sommet, un plan de travail sur 10 ans a été proposé pour chercher le changement des modèles de consommation et de production non durable.

Toutes ces procédures ont été orientées par la suite à l'aide des statistiques et mesures permettant la prise de décision :

- Une étude menée par CITEPA en 2009 a montré qu'en France, le secteur manufacturier représente 22 % des émissions globales des gaz à effet de serre GES avec 13 % pour la transformation d'énergie (figure1.2).

- Des données statistiques montrent que l'industrie manufacturière des États-Unis consomme annuellement 21,1 quadrillions de Btu d'énergie (environ 21 % de la consommation totale

d'énergie américaine) et génère plus de 1,4 milliard de tonnes d'émissions de CO_2(environ 26 % du total des émissions de CO_2 aux États-Unis).

En conclusion, la maîtrise des émissions environnementales du secteur de la production et l'industrie manufacturière représente l'un des axes d'amélioration et de développement de la notion de durabilité.

2. Changement climatique et enjeux environnementaux

La prise en conscience de l'écologie dépend de l'effet des émissions environnementales sur le changement global de la nature. Ces émissions peuvent avoir plusieurs aspects ainsi qu'origines possibles. On distingue deux formes possibles de menaces écologiques : les changements climatiques et les épuisements des ressources.

2.1. Effet de serre

L'effet de serre est un phénomène naturel nécessaire pour la vie sur terre. Naturellement présents dans l'atmosphère terrestre avec principalement de la vapeur d'eau (H_2O), du dioxyde de carbone (CO_2) et du méthane (CH_4), les gaz à effet de serre (GES) retiennent une large part du rayonnement solaire et permettent ainsi le maintien sur Terre d'une température globale propice à la vie et au développement des espèces vivantes.

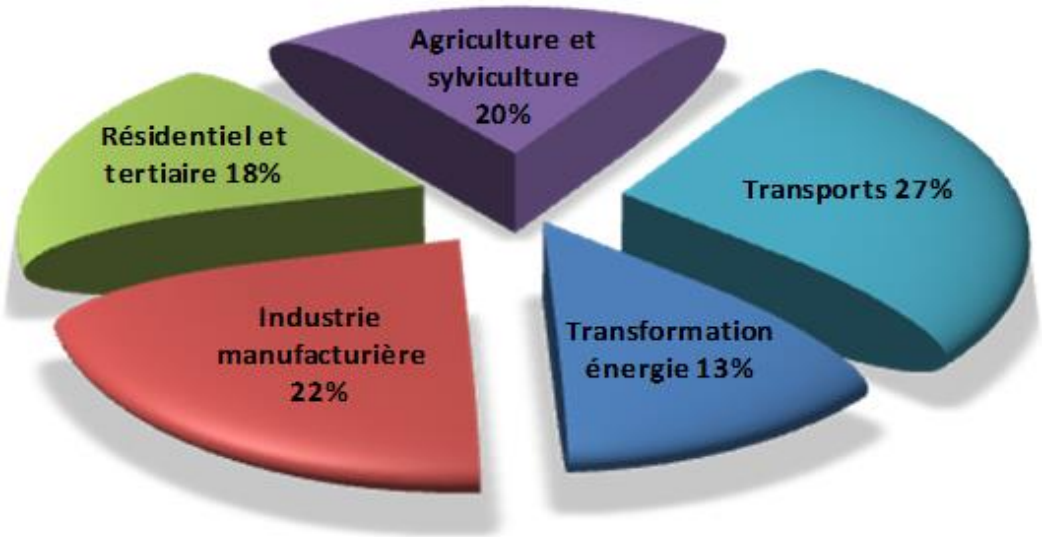


Figure 1.2. *Répartition des émissions de GES par secteur en France*

(Source, CITEPA 2009)

Comme le montre la figure 1.2., l'industrie manufacturière ainsi que le transport en France représente respectivement 22 et 27% des émissions des gaz à effet de serre. Cette statistique montre l'importance de la prise en conscience de l'écologie dans le secteur industriel.

Avec le développement de l'industrie et la dépendance en énergie fossile (charbon, pétrole, gaz…), on constate une augmentation des concentrations de gaz à effet de serre qui peut amener à un risque de modifications climatiques majeures.
La Terre se réchauffant, c'est l'ensemble de la biodiversité et des écosystèmes qui est menacé. Selon les scientifiques, un réchauffement de 1,8 °C à 2 °C entre 1990 et 2050 pourrait conduire à la suppression d'un quart des espèces vivantes.

2.2. Épuisement des ressources

Suite au développement des procédés ainsi que le rythme de vie quotidienne, la consommation des ressources a augmenté très rapidement dans les dernières années. Ce rythme mal étudié peut provoquer un épuisement des ressources de la planète dans un temps très proche. Suite à une étude présentée par « *Sciences et vie 2008* », certaines richesses exploitables de notre planète sont actuellement à stocks limités et peuvent disparaître si on continue son exploitation de la même manière.
Si aucun investissement n'est immédiatement lancé pour lutter contre les effets néfastes prévus à long terme, la compensation des dégâts occasionnés risque de couter beaucoup plus cher qu'un apport financier qui serait réalisé aujourd'hui.
Donc, le réchauffement global ainsi que l'épuisement des ressources représentent une menace pour le secteur industriel. D'où le besoin de la maîtrise des émissions environnementales ainsi que la consommation des ressources pour éviter des dépenses économiques probables pour les différents domaines de production.

3. écoconception et Analyse du cycle de vie

La réduction des impacts environnementaux des produits le long de leur cycle de vie, tout en préservant la qualité d'usage du produit ou en l'améliorant est l'objectif principal de l'écoconception ou l'intégration de l'aspect écologique dans la phase de conception ou de développement du produit.

3.1. Eco-conception

Selon la norme ISO14062, l'éco-conception est définie comme étant l'« Intégration des aspects environnementaux dans la conception et le développement de produits ».

La normalisation ainsi que les régulations environnementales ont été développées suite à certains travaux qui ont débuté depuis1987. (Holloway et al, 94) ont montré, à base des études développées par Jakobsen. K, que le développement d'un produit peut se baser sur le choix des matériaux, les procédés de fabrication avant même de préparer sa forme finale. C'est à ce niveau du cycle de vie d'un produit qu'on peut agir et intégrer l'aspect environnemental.

Ainsi, la sensibilisation du point de vue environnemental a comme objectif de changer le champ de vision du manager : la prise en compte de l'environnement est un choix et non pas une contrainte.

L'approche de l'écoconception a été introduite en deux voies possibles (Bakkar. C, 95) :

1) Une première approche de l'écoconception est basée sur l'amélioration technologique des produits dans le but de prendre en compte les émissions environnementales durant le cycle de vie de ce produit. C'est la conception écologique.
2) Une deuxième approche qui tend à changer totalement le mode de vie industriel par le développement de nouveaux produits, nouveaux services permettant la mise en place de la durabilité ou développement durable.

Ces deux approches ont été définies par (Manzini. E, 91) comme « une activité de conception dont l'objectif est de lier ce qui est techniquement possible à ce qui est écologiquement nécessaire afin de préparer des solutions acceptables socialement et culturellement ».

3.2. Niveaux d'éco-conception

Basé sur les deux approches présentées de l'éco-conception (Brezet, 97), ont défini 4 niveaux possibles d'innovation pour intégrer l'aspect écologique dans la logique de conception des produits :

Niveau 1 : Amélioration incrémentale du produit

Niveau 2 : Re-conception du produit : à ce niveau, les modifications peuvent toucher la structure du produit ou les technologies employées.

Niveau 3 : Innovations sur les fonctionnalités du produit.

Niveau 4 : Innovations sur le système global dans lequel s'insère le produit considéré.

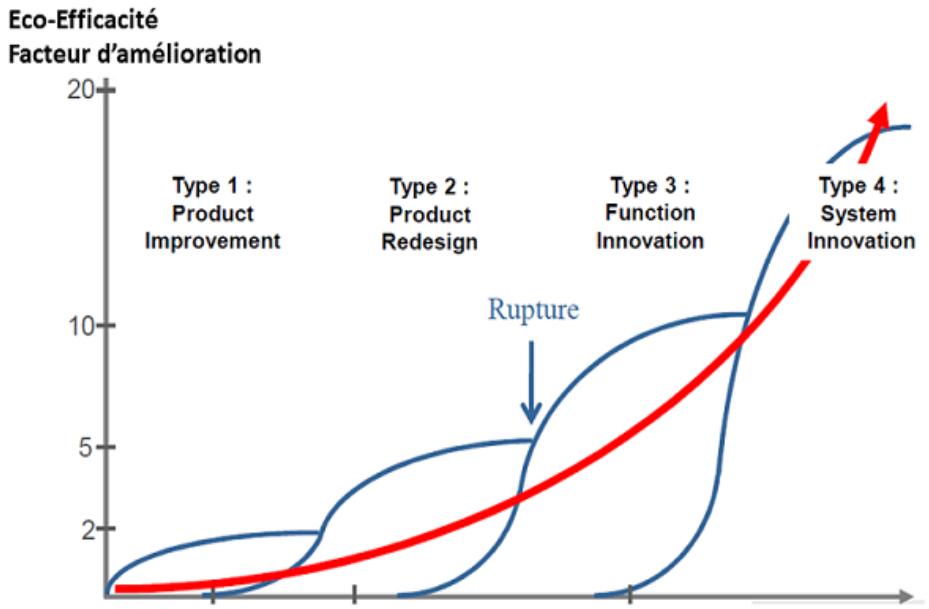


Figure 1.3. *Les niveaux d'écoconception (Brezet, 97)*

La courbe de Brezet (figure 1.3) tend à coupler le niveau d'intégration de l'éco-conception et le facteur de réduction des émissions environnementales. Pour les deux premiers niveaux, on peut affirmer que cette minimisation est possible et peut être atteinte grâce à une logique de maîtrise des fonctionnalités du produit désigné.

Ainsi, dans le même cadre, McAloone pense que les niveaux 3 et 4 ne peuvent pas être atteints que si les modes de pensées changeaient. En effet, ces derniers niveaux nécessitent une combinaison entre les approches classiques de conception avec des approches sociales (McAloone, 00).

La plupart des entreprises sont des PME fabricant des produits plus ou moins complexes. Cela rend l'intégration de l'aspect environnemental une nécessité inéluctable tout en adoptant une stratégie bien étudiée. Cette intégration de l'éco-conception du produit doit être l'un des objectifs stratégiques de la société indépendamment du niveau à atteindre.

Le respect de l'environnement s'avère être un fait primordial dont la conscience a passé par la suite à une nécessité pour garantir le respect de certaines lois et législations définies à l'échelle nationale aussi bien qu'internationale.

3.3. Réglementations et normalisation relatives à l'éco-conception

En Europe, le respect de l'environnement a été introduit comme une interrogation dans un colloque de l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME 02) :
« Après la période du tout jetable de l'après-guerre, du tout recyclable un peu plus récent, serons-nous capables de passer à la promotion à grande échelle de la notion de renouvelable, laquelle a été le fondement de notre civilisation pendant des millénaires ? »
Cette interrogation met bien en évidence un certain degré de conscience des menaces pouvant détruire notre planète.

Dès cette interrogation, les entreprises ont commencé à recevoir des pressions issues d'une prise de conscience généralisée, mais qui se traduit de différentes manières selon le mode de son issu ?

3.3.1. La Politique intégrée des Produits (PIP)

Lors du Conseil européen de Göteborg en 2001, la commission a décidé d'intégrer la dimension environnementale dans la stratégie de l'Union européenne pour le développement économique. Cette initiative a été traduite par le lancement de la PIP ayant pour objectif la réduction des impacts environnementaux des produits le long de leur cycle de vie.

Ainsi, pour mettre en place cette initiative et sensibiliser les acteurs économiques à cette démarche, la commission a procédé par voie de communications, notamment celles du 7 février 2001 (Livre vert sur la PIP) et du 18 juin 2003 (PIP - Développement d'une réflexion environnementale axée sur le cycle de vie).

Le livre vert développé par la Commission des Communautés européennes propose une stratégie de renforcement et de recentrage des politiques de l'environnement liées aux

produits pour promouvoir le développement d'un marché qui favorise la commercialisation de produits plus écologiques.

La commission a défini les objectifs suivants pour le PIP :

- Contribuer à atteindre les objectifs environnementaux fixés dans le 6e programme d'action communautaire pour l'environnement (PAE) et dans la stratégie développement durable en y intégrant une dimension "produit". La PIP est partie intégrante des stratégies de gestion durable des ressources et des déchets.
- Compléter les politiques de produit déjà en place par un cadre plus vaste (la vision cycle de vie).
- Renforcer la coordination et la cohérence de la politique environnementale des produits (où l'établir, pour les mesures à venir).

L'approche PIP développée est basée sur les points suivants :

1) Une réflexion axée sur le cycle de vie du produit : ceci vise à limiter les incidences environnementales cumulées tout au long de la vie du produit, mais également à éviter un simple déplacement du problème environnemental à un autre stade de la vie du produit. Le système sera dès lors cohérent et plus performant.
2) Utiliser les mécanismes du marché : il faut favoriser l'évolution du marché vers une meilleure protection de l'environnement en encourageant l'offre et la demande de produits respectueux de l'environnement par l'établissement d'incitants en ce sens. La Commission a imaginé d'aider le marché à intégrer le coût environnemental dans le prix de revient de produit par l'application du principe du "pollueur - payeur" (obligation faite au producteur de l'intégrer dans ses prix par l'application de taux d'imposition différencié - ce concept vient d'être officiellement entériné dans le cadre global de la politique européenne de l'environnement par la Directive 2004/35/CE du 21 avril 2004) et d'éclairer le choix du consommateur par son éducation et son information.
3) Impliquer les parties intéressées : il s'agit d'encourager les agents en interaction avec le produit (producteur, consommateur, pouvoirs publics) à agir dans leur sphère d'influence en faveur d'une meilleure protection de l'environnement (conception pour les producteurs, utilisation et élimination pour les consommateurs, réglementation pour les gouvernants, ainsi que l'intégration de considérations environnementales dans les nouvelles procédures harmonisées de marchés publics, Directives 2004/17/CE et 2004/18/CE).
4) Améliorer le produit en permanence : des améliorations pourront toujours être apportées lors de la conception ou toute autre étape du cycle de vie. À chaque acteur d'établir son propre rythme.
5) Des instruments d'action diversifiés : en raison de la grande diversité des produits et des parties intéressées, les instruments à mettre en place se doivent d'être nombreux. Néanmoins, la PIP privilégie les actions volontaires aux mesures contraignantes (qui seront toutefois ponctuellement indispensable). Le seul facteur pertinent est l'efficacité de l'instrument, quel qu'il soit.

3.3.2. La directive Ross

Cette directive a été développée le 27 janvier 2003 en relation avec la directive 2002/96/CE qui soulève le traitement des Déchets d'Équipement électrique et électronique (DEEE).
La Directive 2002/95/CE (dite "LSDEEE" ou "Ross" en anglais) impose l'élimination à la conception de certains matériaux dangereux dans ces EEE. La Commission entend ainsi protéger l'environnement et la santé humaine via l'amélioration des performances environnementales des agents économiques impliqués dans la production de ce type d'équipement.
Entrée en vigueur le 1er juillet 2006, cette directive cherche à remplacer les substances dangereuses existant dans les EEE par d'autres substances ou matières. Ces substances sont :
Le plomb, le mercure, le cadmium, le chrome exavalent, les polybromodiphényles (PSB) et polybromodiphényléthers (PBDE).

3.3.3. La directive eut : Éco-conception des produits consommateurs d'énergies

Adoptée le 6 juillet 2005, elle s'inscrit dans la politique intégrée des produits dont elle constitue un exemple concret, puisqu'elle impose aux entreprises d'agir pour le développement durable en minimisant la production de déchet et l'utilisation d'énergie à un stade particulier du cycle de vie des produits consommateurs d'énergie: la conception.
La directive s'appliquera aux produits consommateurs d'énergie (à l'exception des véhicules), c'est-à-dire "un produit qui, une fois mis sur le marché et/ou mis en service, est dépendant d'un apport d'énergie (...) pour fonctionner selon l'usage prévu, ou un produit permettant la génération, le transfert et la mesure d'une telle énergie".

3.3.4. Norme d'éco-conception : NF E 01-005

Présentée le 28 aout 2010, la norme NF E 01-005 propose une méthodologie d'écoconception adaptée aux produits mécaniques, qui tient compte des lignes directrices développées dans le XP ISO/TR 14062, Management environnemental-intégration des aspects environnementaux dans la conception et le développement de produit.

La norme ou méthodologie présentée est basée sur 5 étapes :

1) Détermination du profil environnemental du produit à (re)concevoir (produit de référence)
2) Sélection/hiérarchisation des lignes directrices
3) Choix des indicateurs environnementaux
4) Suivie des indicateurs
5) Bilan — capitalisation

Cette démarche a été développée à base de l'outil ATEP traitée dans les travaux de Stéphane le Pochat (Le Pochat. S., 2005). L'objectif est de choisir des lignes d'amélioration pour réduire les impacts environnementaux d'un produit. Cette amélioration dépend de la structuration des aspects environnementaux dans le but de préciser et de hiérarchiser les responsables des émissions nocives du produit étudié.

Ces aspects sont au nombre de 7 qui sont : Matières premières (MP), Fabrication (F), Utilisation (U), Recyclabilité en fin de vie (FV-R), Substances dangereuses (S.), Transport (T) et Emballage (Emb).

3.4. Outils d'écoconception

L'objectif de l'intégration d'une démarche d'écoconception est la prise en considération des aspects environnementaux sur toutes les phases du développement du produit. Cette démarche introduit deux aspects pour l'écoconception des produits : l'évaluation des performances environnementales et l'amélioration environnementale.

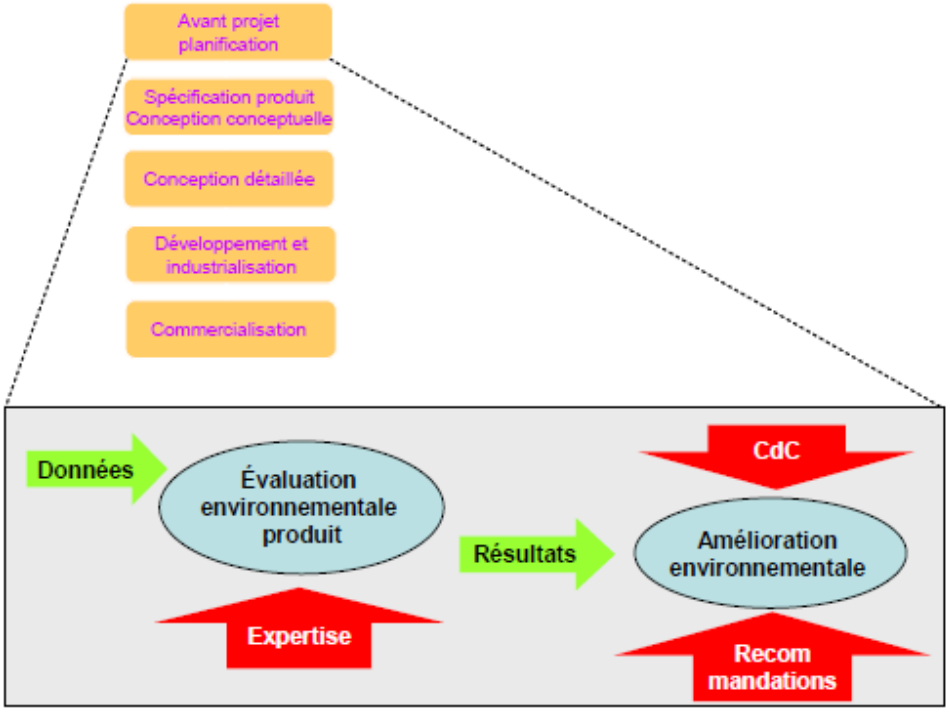


Figure 1.4. *Les phases pivots d'éco-conception (Pochat, 2005)*

L'évaluation et l'amélioration environnementales représentent les deux phases pivots du processus d'éco-conception (figure 1.4). En s'aidant des données du produit, l'évaluation environnementale du produit permet la quantification des émissions écologique du produit. Ces résultats représentent un support d'aide à la décision pour l'amélioration du comportement environnementale du produit étudié.

Plusieurs outils ont été développés pour améliorer chacune de ces deux phases. Certains de ces outils peuvent avoir simultanément la capacité à remplier les deux phases d'amélioration et d'évaluation environnementale (figure1.5).

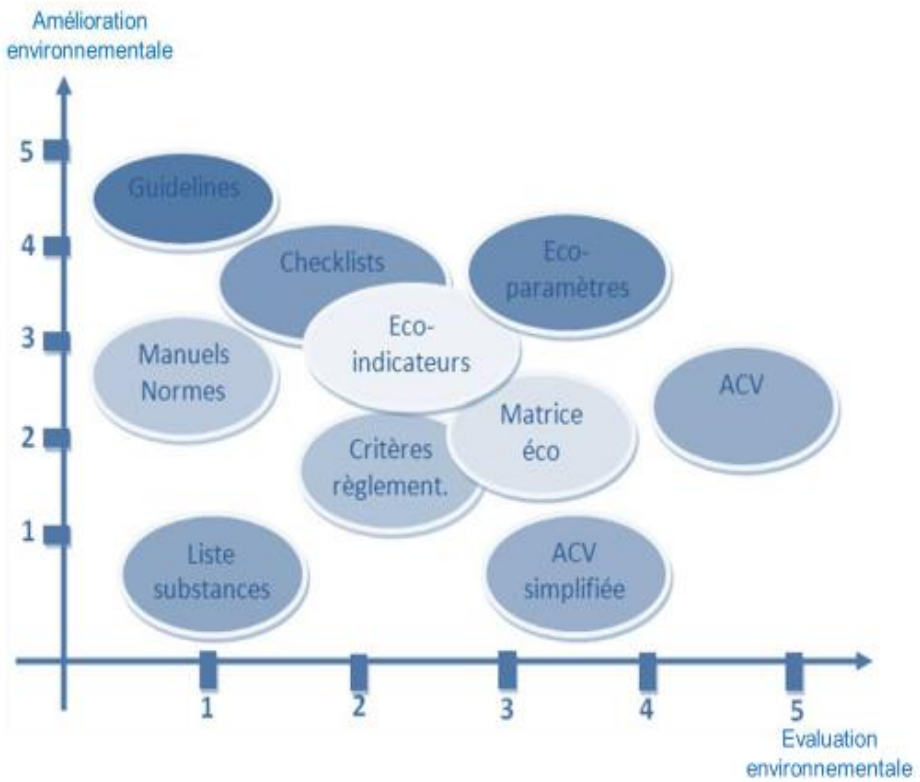


Figure 1.5. *Répartition des outils d'éco-conception (Le Pochat. S., 2005)*

La figure 1.5 présente la répartition ainsi que les fonctionnalités de certains outils développés dans le cadre de l'éco-conception. Les deux axes représentent les deux notions pivots de l'éco-conception : l'amélioration environnementale et l'évaluation environnementale. On remarque que certains outils favorisent l'une des deux notions par rapport à l'autre, mais l'ACV reste l'outil le plus adéquat parmi eux. Ce dernier est considéré comme le meilleur outil pour l'évaluation environnementale (niveau 5) et aide aussi à une amélioration environnementale (niveau 3).

3.4.1. Outils d'évaluation environnementale

Ces outils ont pour objectif « la mise en œuvre des méthodes et des procédures permettant d'estimer les conséquences sur l'environnement d'une politique, d'un programme ou d'un plan, d'un projet ou d'une réalisation ; par extension, le rapport qui en rend compte » (Melquiot, 2003).

On distingue plusieurs outils dans ce sens dont on peut citer :

1) Des Logiciels DFX : ils permettent l'évaluation environnementale des produits sur des aspects environnementaux ciblés tels que : matériaux, énergie, rejets et recyclabilité…
2) Les Méthodes matricielles **:** ce sont des méthodes basées sur l'identification et la quantification des impacts écologiques le long des différentes phases du cycle de vie. Ces méthodes peuvent être qualitatives telles que : la méthode ESQCV (AFNOR 98a), ou quantitatives, exemple : MET Matrix. (Brezet, 97a), qui est une méthode capable de mettre l'accent sur l'évaluation à base de l'énergie, matériaux et substances toxiques.

3) Les check-lists : elles se présentent sous la forme des listes de questions qui permettent une analyse du produit selon ses caractéristiques fonctionnelles. Elles ne permettent pas de réaliser une évaluation environnementale, mais elles ont l'avantage de « noter » de manière simple le produit de façon à créer un référentiel. L'objectif d'une checklist est de pouvoir comparer des solutions à ce référentiel.

D'autres outils ont été aussi développés : les outils d'évaluation paramétrique, les éco-indicateurs, mais l'analyse du cycle de vie (ACV) représente l'outil le plus performant au niveau de l'évaluation environnementale.

3.4.2. Outils d'amélioration environnementale

Elle permet de faire « progresser » un produit vers une meilleure prise en compte de l'environnement. Mais pour permettre cette amélioration, il faut connaître à minima les éléments les plus impactant, pour permettre aux concepteurs de travailler dessus lors de la conception du produit. Cet aspect doit permettre une aide à la décision lors de la conception.
On distingue les outils suivants :

- Les outils de créativité « E » et d'aide au choix de solutions de conception « E **»** :l'objectif de l'implémentation de ces outils est l'amélioration des performances environnementales d'un produit. Il s'agit par exemple du QFDE39 (Masui 01 & 02 ; Sakao, 01 & 02), de la méthode TRIZ appliquée à la recherche de solutions environnementales (Chen, 02 ; Jones, 00 ; Lindemann, 01) ou encore de l'AMDEC utilisée pour établir les priorités environnementales (Oberender, 01 ; Ritzén, 97 ; Dahlström, 99).
- Les guidlines : Les guidelines sont les outils de base pour l'amélioration environnementale des produits. Ils constituent le recueil des lignes directrices, règles générales et « universelles », pour l'éco conception. Bien que l'ensemble de ces règles soit défini et a priori non évolutif, il existe toutefois des méthodes différentes dans la façon de classer ces règles et de les hiérarchiser (Hemel, 98 ; Wimmer, 01).

3.5. Analyse du cycle de vie (ACV)

L'analyse du cycle de vie représente un outil destiné à la quantification de l'impact environnemental d'un produit ou d'un procédé le long des différentes phases de son cycle de vie. Ces stages de cycle de vie regroupent les phases allant de l'extraction de la matière première jusqu'à la fin de vie : ils sont désignés par l'expression « du berceau à la tombe ».

3.5.1. Histoire d'ACV

L'ACV a été développé dans les années 1970 comme étant la conséquence d'une prise en conscience de la crise énergétique de cette période. Le premier pas a été démontré aux États-Unis, où la société Coca-Cola a comparé la consommation des ressources pour deux types de produits en 1969. Cette approche a été dénommée Analyse des Ressources et du Profil environnemental (ARPE) et elle représente la première étude vers l'analyse du cycle de vie.

Par rapport à l'ARPE, l'ACV a étendu son champ d'analyse, pour intégrer l'utilisation des autres ressources ainsi que les impacts des émissions et la création de déchets.

Cet avancement a été accompagné par la naissance d'une approche similaire en Europe sous le nom : Écobilan. Dans ce sens, vers les années 1972, Ian Boustead au Royaume-Uni, a calculé l'énergie totale employée pour la production de certains types de contenants pour boissons tels que le verre, le plastique, le métal et l'aluminium. Par la suite, Boustead consolida sa méthodologie afin d'étendre l'utilité de cette dernière à d'autres matériaux. Il publia ainsi en 1979 le 'Handbook of Industrial Energy Analysis' (Jensen et al, 1998).
Dés que les grandes lignes de l'approche ont été développées, les années 80 et début des années 90 verront un développement et une utilisation importante de l'approche due à deux raisons :

1) Développement des méthodes pour quantifier les impacts des produits participants à différentes catégories de problèmes écologiques tels que le réchauffement planétaire, la perte des ressources.
2) L'approche d'ACV commence à être de plus en plus accessible au public

Ce développement a été l'objectif global de la coopération entre les industries, les universités et les gouvernements pour arriver à publier et à organiser l'ACV à l'échelle internationale. Parmi les acteurs dans cette démarche, on distingue :

- La Société de toxicologie et chimie environnementales (SETAC)
- Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE)
- CIRAIG (Centre Interuniversitaire de Référence sur l'Analyse, l'Interprétation et la Gestion du cycle de vie des produits, procédé et service) : fondé en 2001 à l'initiative de l'École Polytechnique de Montréal et HEC Montréal, le CIRAIG collabore avec de nombreux centres de recherche à travers le monde et participe activement à la recherche et au développement d'outils pour le secteur industriel et les gouvernements.
- Environmental Protection Agency (EPA)
- Society for the promotion of Life cycle Development (SPOLD)
- Le réseau européen LCANET
- Centre of Environmental Science (CML) de l'Université de Leiden (Pays-Bas)
- ISO (International standard Organisation) œuvre à l'amélioration et à la promotion de l'ACV

CIRAIG, PNUE et SETAC représentent des références nationales et internationales en matière d'ACV. Tous trois sont les fondateurs d'un partenariat international sur le cycle de vie : LCI (Life Cycle Initiative) ayant pour mission le développement et la diffusion des outils pratiques permettant d'évaluer les solutions, les risques, avantages et inconvénients associés aux produits et services tout au long de leur vie.

3.5.2. Présentation de l'ACV

Selon l'ISO 14040, l'Analyse du Cycle de Vie est définie comme étant « une méthode qui étudie les aspects environnementaux et les impacts potentiels tout au long de la vie d'un produit (c'est-à-dire du berceau à la tombe), de l'acquisition de la matière première à sa production, son utilisation et sa disposition ».
En effet, cette méthode mettait en place une démarche pour l'évaluation des impacts environnementaux ainsi que la suivie de la consommation des ressources aux différentes

phases du cycle de vie d'un produit : extraction de ses matières premières, transformation, production, utilisation du produit et la mise au rebu (figure 1.6).

Figure 1.6. *Les phases du cycle de vie*

L'ACV a été organisé à l'aide de la norme ISO 14040, et elle passe par les quatre étapes suivantes (figure 1.7) :

1) Définition des objectifs et du champ de l'étude : cette étape consiste à définir le produit ou processus à étudier ainsi que l'unité fonctionnelle qui représente une base de comparaison ou de référence pour l'étude.
2) Analyse de l'inventaire : C'est la préparation du flux d'entrées/sorties pour chaque étape de cycle de vie du produit étudié. C'est une procédure de collecte des données.
3) Évaluation des impacts : il s'agit de la quantification de l'empreinte écologique de l'activité ou produit étudié. À partir de l'ICV, on regroupe sous forme de catégorie d'impacts dus à l'utilisation des ressources ainsi que les émissions.
   Généralement, trois grandes familles d'impacts sont prises en compte : Épuisement des ressources, Impacts sur la santé humaine et Impacts écologiques. Selon les bases de données développées, on constate plusieurs méthodes d'évaluation pour cette étape de l'ACV.
4) Interprétation : C'est le résumé des résultats obtenus sous la forme d'un rapport qui sert à la préparation des stratégies pour la réduction des impacts.

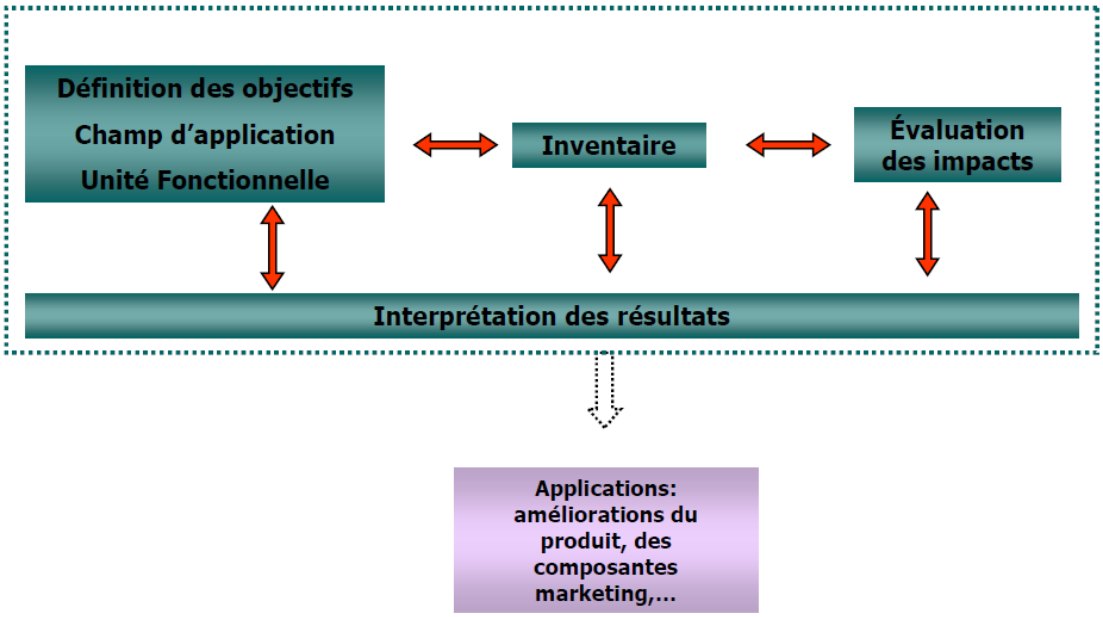


Figure 1.7. *Les étapes d'analyse de cycle de vie (norme ISO 14040)*

3.6. Méthodes d'évaluation des impacts environnementaux

L'évaluation des impacts représente une comparaison d'une substance donnée à d'autres substances sur leur faculté à endommager l'environnement et la santé humaine.
En effet, lorsqu'une substance polluante est émise, elle évolue dans l'atmosphère : sa concentration est modifiée, elle change d'état et de milieu. Le cheminement qu'elle suit est appelé la voie d'impact. Ainsi, les méthodes d'analyse d'impact reposent sur la modélisation de ces voies d'impact en reliant les données d'inventaire aux dommages environnementaux potentiels.
Une méthode de quantification n'est réellement que :
1) Un jeu d'indicateur d'impact
2) Des facteurs pour caractériser les flux : traduire les flux (entrant/sortant) en impact.
3) Éventuellement :
- Des données de normalisation. Normaliser revient à deviser la valeur d'un flux ou d'un impact par la valeur de ce même flux ou impact à l'échelle d'un territoire donné.
- Des facteurs de pondération des impacts entre eux permettant d'obtenir une note unique ou « single score ».
Les méthodes de quantification des émissions sont regroupées en deux catégories : Mid point et End point ainsi que les monocritères et multicritères.
Comme le montre la figure 1.8, les substances enregistrées au niveau de l'inventaire ont des impacts directs qu'on les appelle : indicateurs de catégorie. Ces derniers qui sont à l'origine des perturbations sur le système naturel global. Ce système est décrit à l'aide de certains indicateurs qu'on l'appelle : indicateur de dommages.

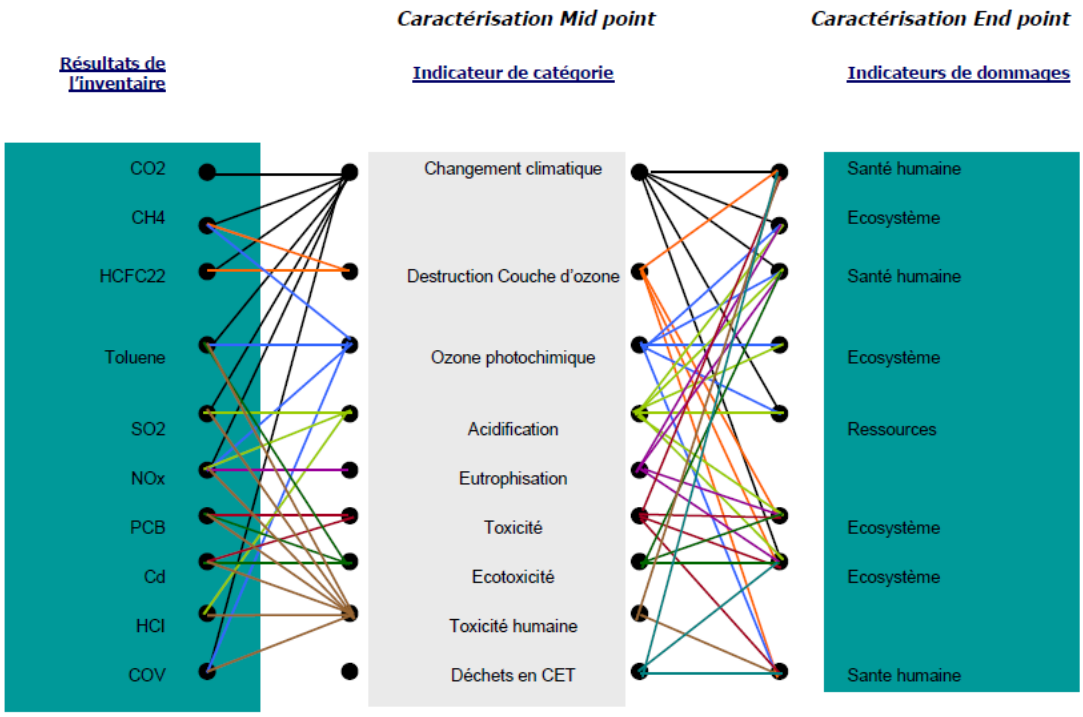


Figure 1.8. *Catégorie d'impacts environnementaux*

Parmi ces méthodes, on peut citer :

1) ***Mid point monocritère*** : IPCC (Facteur revu régulièrement(2007), 3 niveaux (20, 100 et 500 ans), la plus reconnue et utilisé dans plusieurs méthodes, Limites : c'est une méthode regroupant un seul indicateur)

2) Mid point multicritères :

CML :

C'est une méthode développée par l'université de Leiden (NL), en 1992 révisée en 2000 et en 2001. Elle comprend 50 indicateurs calculés en 3 étapes : Classification, Caractérisation et Normalisation. C'est la méthode la plus utilisée et la plus consensuelle.

Ces indicateurs développés offrent une marge d'erreur faible avec la possibilité d'approfondir sur certains indicateurs.

Cette méthode souffre d'une possibilité de trop d'indicateurs pour les novices

EDIP: Environmental Design of Industrial Products

Méthode développée en 1996 et mise à jour en 2003. Elle est intéressante pour les indicateurs calculés selon la méthode des volumes critiques : Écotoxicité des émissions : dans l'air/ dans l'eau ainsi que la toxicité humaine des émissions : dans l'eau/dans l'air

La limite de cette méthode réside au niveau de l'indicateur *'toxicité'*.

TRACI : développée par US EPA

Elle est très applicable et axée sur les risques toxicologiques. C'est une méthode qui traite l'influence des impacts environnementaux sur l'homme.

Sa limite est enregistrée au niveau de l'imprécision des résultats pour l'indicateur toxicité.

3) ***End point monocritère*** : **Empreinte écologique**

C'est une catégorie de méthodes simples avec indicateur exprimé en surface. Mais cette méthode est monocritère et discutable au niveau scientifique.

4) ***End point multicritère*** : Eco indicateur 99

Cette méthode est basée sur une modélisation fine qui tient compte des phénomènes de propagation et d'exposition.

La méthode est à orientations dommages causés: les indicateurs traduisent des dommages sur la santé et l'environnement.

C'est une approche graduelle permettant la caractérisation des dommages en un indicateur unique.

Les limites de cette méthode résident au niveau du risque possible en cas de l'utilisation systématique de l'indicateur unique sans analyser les résultats intermédiaires. Ainsi, ces méthodes de calcul des indicateurs sont moins consensuelles que la méthode CML.

3.7. Logiciels pour ACV

Pour mettre en évidence la démarche d'ACV des produits, les travaux ont abouti au développement des outils de calcul aidant à la quantification des émissions et la consommation des ressources le long du cycle de vie d'un produit : de l'extraction de la matière première jusqu'à la fin de la vie du produit.

Les logiciels d'ACV ont été réalisés par trois catégories d'organismes :

- Les instituts de recherche et universitaires
- Les consultants en environnement
- Les industriels

Ces efforts représentent au début une réponse à des besoins spécifiques puis ils ont été orientés vers l'aspect commercialisation.

On distingue des logiciels payants et d'autres gratuits. En terme de licences vendues, quatre logiciels dominent le marché de l'ACV et représentent plus de la moitié des ventes de licences qui sont : Sima Pro, NIRE-LCA, LCAIT et Umberto (figure 1.9).

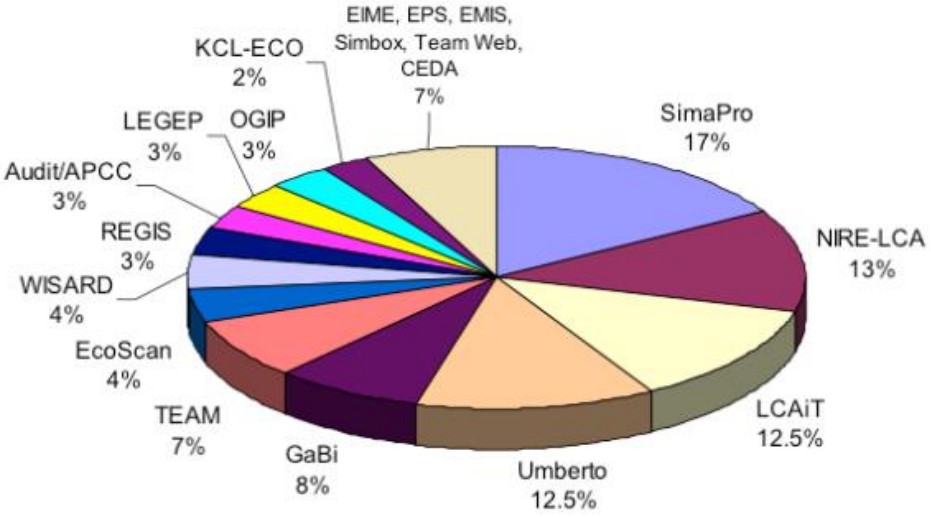


Figure 1.9. *Répartition des logiciels d'analyse de cycle de vie (LCA software guide 2005)*

Pour les outils gratuits, on constate : EIO-LCA/TRACI/GEMIS/CEDA/CMLCA…pour cette catégorie, EIO-LCA domine le marché international.

3.7. Démarches d'intégration de l'Eco-conception

L'intégration de l'éco-conception représente un problème complexe dépendant de certaines contraintes telles que : les types des produits, la technologie utilisée, les législations…
Pour étudier certains aspects et problématiques d'amélioration des produits, on distingue plusieurs approches développées.
(Gatherine M. R et al, 2002), ont proposé une approche d'amélioration pour l'éco-conception en mettant l'accent sur les stratégies de fin de vie. Cette méthodologie nommée End-of-Life Design Advisor "ELDA" permet de garantir le moins d'impact sur l'environnement avec le coût de la mise en œuvre plus réduite du cycle de vie. Il permet enfin de faire une comparaison entre le meilleur traitement actuel de fin de vie mise en œuvre dans l'industrie et de fin de vie recommandée par ELDA et a déterminé les futurs efforts nécessaires pour les concepteurs, les recycleurs et les décideurs politiques.
De même (Brissaud. D et Zwolinski. P, 2004) ont proposé une nouvelle approche nommée 'Situation-based product design approach' qui s'intéresse au projet de négociation des stratégies et de leurs impacts sur les caractéristiques du produit tout au long des phases de développement de produits en fin de vie.
(Le Pochat. S, 2005) a proposé une méthodologie pour intégrer l'éco-conception dans les industries nommées MAIECO avec un outil d'évaluation environnementale dite ATEP dont les résultats sont améliorés par règlement. Tous les résultats seront capitalisés pour les objectifs futurs.
(Princaud. M, 2011) a proposé une méthode pour intégrer l'éco-conception dans les industries en ajoutant les fournisseurs dans le processus. Il a réussi à la création d'un outil d'éco-conception des navires que l'on appelle l'océan avec un nouvel Eco Indicateur composé de 24 indicateurs marins dits EIM.
Selon (Dufrene. M et al, 2013), malgré la multiplicité des outils et des méthodes, leur utilisation reste limitée et théorique. Il a proposé une méthodologie d'éco-conception soutenue par la plate-forme d'ingénierie pour assurer la meilleure cohérence entre les outils d'éco-conception. Il a appliqué sa méthodologie à une hotte, qui est arrivée à une réduction de CO_2de 42% émis et sans transfert d'impact majeur.
Une comparaison des méthodes d'éco-conception est faite par (Seong-Rin. L et al, 2013) entre l'optimisation multi-objectifs et un problème mono-objectif qui a utilisé la monétisation des impacts environnementaux à coût économique, ainsi une méthode d'éco-conception est proposée pour développer un modèle mathématique d'optimisation d'une fonction mono-objectif.
(Shu-Kai S. Fan et al, 2013) ont proposé une approche dans laquelle ils ont réussi à minimiser le coût de démontage d'un ordinateur portable à son stade de fin de vie en utilisant le logiciel de Prodtect 1.3.
On constate un nombre important d'approches en éco-conception basées sur l'analyse de cycle de vie. Ce dernier semble inefficace dans ce cadre pour beaucoup de raisons. (Millet. D et al, 2005) ont affirmé que l'ACV n'est pas destiné pour un concepteur vu la dépendance de cet outil à l'inventaire de cycle de vie et la collecte des données.
Ainsi, les approches développées par la suite ont mis l'accent sur l'aide à la décision du concepteur pour la mise en place d'une démarche d'éco-conception selon le produit étudié. Ce

type de travaux est, à chaque fois, basé sur l'un des stages de cycle de vie : fin de vie par exemple. Parmi les phases les plus importantes dans le cycle de vie d'un produit on trouve la fabrication. Ce stage peut être amélioré pour l'intégration de l'aspect écologique à un tel produit. On enregistre certaines carences au niveau des approches en éco-conception mettant l'accent sur la phase de fabrication. C'est dans ce sens que les travaux ont été dirigés vers le développement de l'éco-fabrication.

4. Eco-fabrication et fabrication durable

La fabrication est la transformation de la matière première en produit ce qui cause des rejets de déchets et émissions environnementales.

L'Eco-fabrication est définie comme étant 'la création des produits manufacturés qui utilisent des procédés qui minimisent les impacts négatifs sur l'environnement économisent l'énergie et les ressources naturelles et qui sont sans danger sur les employés, les communautés et consommateurs'. L'éco-fabrication met en œuvre 3 dimensions ou piliers : Énergie, process et matériaux.

Ainsi (Joshi et al, 2006) ont montré qu'il est essentiel d'aller au-delà du concept traditionnel 3R pour promouvoir les technologies vertes (réduire, Réutiliser-Recycler) vers une notion plus avancée qui est le concept 6R (Réduire-Réutiliser-Récupérer-Reconcevoir-Refabriquer-Recycler) qui forme une notion de base pour le développement de l'éco-fabrication. (Fig1.10).

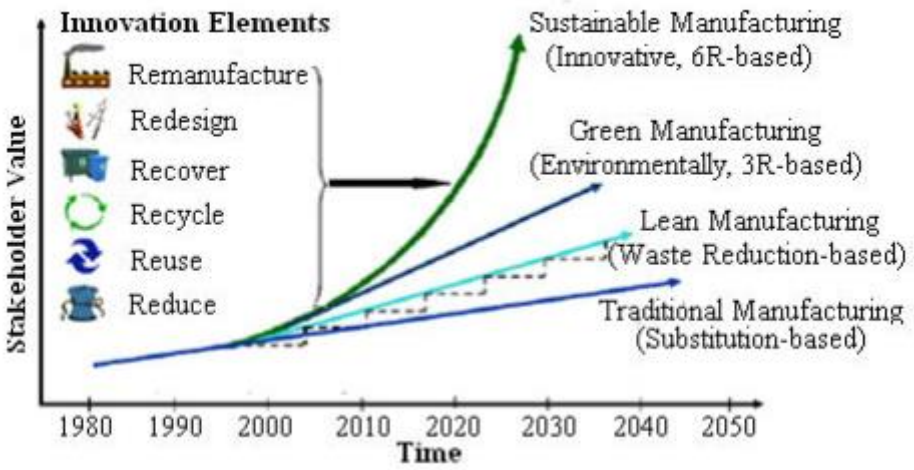


Fig.1.10. *Évolution et développement de l'Eco-fabrication (Jawahir. IS et Dillon. OWJR, 2007)*

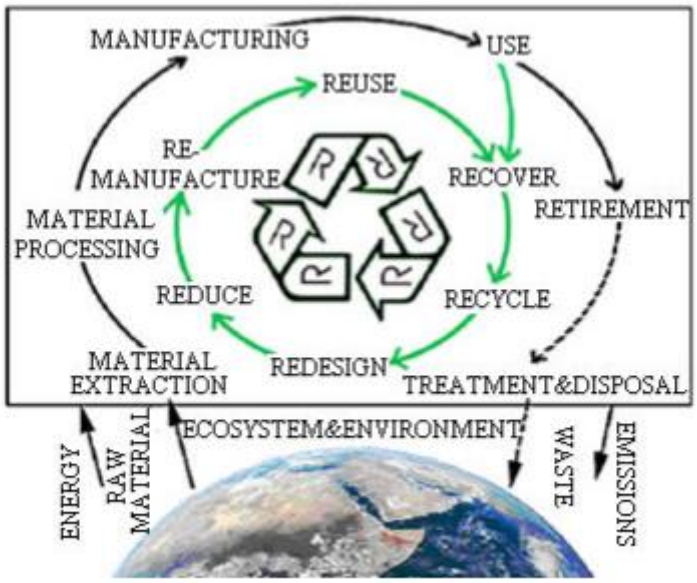


Fig.1.11. Concept du 6R (Jaafar. IH et al, 2007)

(Rajemi et al, 2010) ont affirmé que la minimisation de la consommation des ressources en préfabrication et la réduction de l'utilisation de l'énergie et des matériaux représentent des lignes directrices importantes pour la mise en place du concept 6R. Ce dernier peut être amélioré par la suite à l'aide de la réduction des déchets lors de la phase de fabrication. (Municipal Solid Waste 2008).
Ainsi, les travaux pour l'éco-fabrication ont souligné 3 niveaux d'étude dans ce domaine : la modélisation énergétique, la maîtrise du processus et l'étude des matériaux.

4.1. Modélisation de l'éco-fabrication à base des processus

Le développement technologique et la concurrence entre les pays industrialisés ont poussé les États-Unis à lutter pour la maîtrise écologique et technologique des procédés de fabrication par rapport aux pays de l'Union européenne ainsi que la Chine et le Japon.
Un processus de fabrication dépend de certains facteurs tels que : compréhension du comportement du matériau de la pièce, développement des simulations des procédés, ainsi que la modélisation des technologies (capteurs, instrument de contrôle…). (Gutowski et al, 2001) ont conclu que la modélisation de ces éléments permet de comprendre la valeur économique et écologique du process étudié.
(Giachetti, 1998) a proposé un modèle analytique permettant le suivi et le stockage des caractéristiques des matériaux le long d'un process de fabrication dans le cadre de la mise en œuvre de la conception pour la fabrication.
(Lin et Polenske ,1998) ont étudié l'influence du flux entrées/sorties sur le coût des déchets à l'aide de l'exemple de la fabrication de l'acier. Ainsi (Sutherland et Gunter, 2001) ont suivi la même approche pour modéliser l'effet de la planification des processus sur la production des déchets.

Pour présenter une modélisation globale d'un système de fabrication (Gutowski. T, 2004) et (Dahmus. J, 2005) ont proposé un modèle pour l'analyse des impacts environnementaux pour différents procédés de production.
(Zhang et al, 2000) ont modélisé la consommation de ressources matérielles le long d'un procédé de fabrication. Cette analyse permet d'aboutir à une décision pour l'optimisation et la gestion de la consommation des ressources.
La plupart des travaux sur le niveau de production impliquent la planification des processus et le processus de routage pour l'amélioration de la performance énergétique. En raison de la complexité des décisions de flux de processus, la plupart des recherches se concentrent sur les coûts et les temps de cycle. Il ya un manque d'outils pour optimiser le flux de processus basé sur des objectifs de développement durable, et ceux qui étaient proposés ont peu de résultats concrets (Tan et al, 2006). Dans une tentative de combler cette lacune (Tan et al, 2009) ont combiné la planification des processus de fabrication et l'évaluation des impacts environnementaux en utilisant l'analyse de la liste de contrôle. Ils ont proposé une méthode de prise de décision optimale de nouveaux composants qui inclut la consommation d'énergie dans le cadre de la gestion durable l'évaluation du développement.

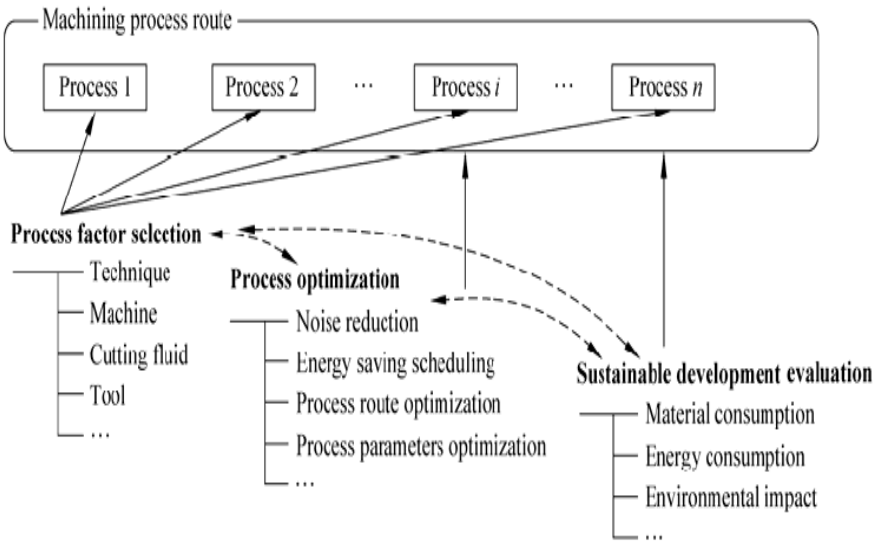


Figure 1.12. *Optimisation de la planification des processus de production à base d'évaluation de durabilité (Tan et al, 2009)*

Ainsi, diverses mesures environnementales peuvent être utilisées pour développer une démarche environnementale de planification du système de production qui fonctionne avec les méthodes de planification de processus conventionnels pour évaluer les compromis entre les exigences environnementales et de productivité (Krishnan et Sheng, 2000). L'analyse multi objectifs peut être utilisée pour soutenir la planification de processus vert (Yeo et New, 1999) afin d'optimiser les matières premières, secondaires, et de la consommation d'énergie et d'autres impacts environnementaux (He et al, 2005). En utilisant les bases de données et les référentiels modèles, l'intégration de l'optimisation de la consommation d'énergie de processus comme partie de l'algorithme de sélection des processus dans un programme de planification de processus est possible comme elle était démontrée par (He et al, 2007).

En se basant sur la modélisation, Input-Process-Output (IPO), (Cao Huajun et al, 2005) ont utilisé une modélisation matricielle pour définir les données d'entrées sorties d'un procédé de fabrication et par la suite l'analyse des impacts environnementaux résultants. Ainsi, (Jiang. Z et al, 2008) ont appliqué la modélisation IPO combinée avec une approche d'agrégation pour une étude de cas :'valve body'.

(Xue. H et al, 2007) ont appliqué le bilan des matières sous la forme de la loi IPO pour optimiser les impacts environnementaux issus de la fabrication des châssis.

(Qun.S et Weimin.Z, 2012) ont étudié la diminution de l'empreinte carbone (équivalent CO_2) pour les procédés d'usinage en modélisant le flux d'entrées/sorties pour chaque opération.

(Xian-Chun.T et al, 2011) ont étudié la possibilité de la combinaison entre l'optimisation des paramètres technologiques, ainsi que les ressources consommées à l'aide de certains outils de modélisation tels qu'IPO et Genetic Simulated Annealing Algorithm (GSAA).

(Eastlick et al, 2011) ont proposé une méthode pour la comparaison de certaines alternatives de conception des processus de fabrication en tenant compte des 3 piliers du développement durable. Cette étude a été appliquée pour la fabrication de certains composants en titane.

En 2009 (Gutowski et al, 2009) a publié le résumé de certains travaux expérimentaux permettant la détermination de la demande en énergie électrique pour différents procédés de fabrication. Comme c'est indiqué dans la figure 1.13, le besoin en énergie électrique dépend du taux de la matière enlevée ainsi que du type du procédé utilisé.

L'usinage par enlèvement de matière peut être considéré parmi les processus de fabrication les plus importants et il est responsable d'environ 5 % du produit intérieur brut (PIB) des pays développés. Ainsi, l'impact indirect de l'usinage est important vu le compromis cherché entre la qualité du produit ainsi que le coût de la fabrication. (Jayal et al, 2010).

Malgré ce qui précède, l'évolution vers l'usinage durable ou éco-usinage est considérée lente et non organisée. Ceci est illustré dans l'absence d'une méthodologie directe permettant, à l'aide d'un modèle virtuel, de simuler et examiner systématiquement les processus d'usinage dans l'objectif d'optimiser et modéliser les opérations avec le minimum d'impact écologique. (Shao. G et al, 2010).

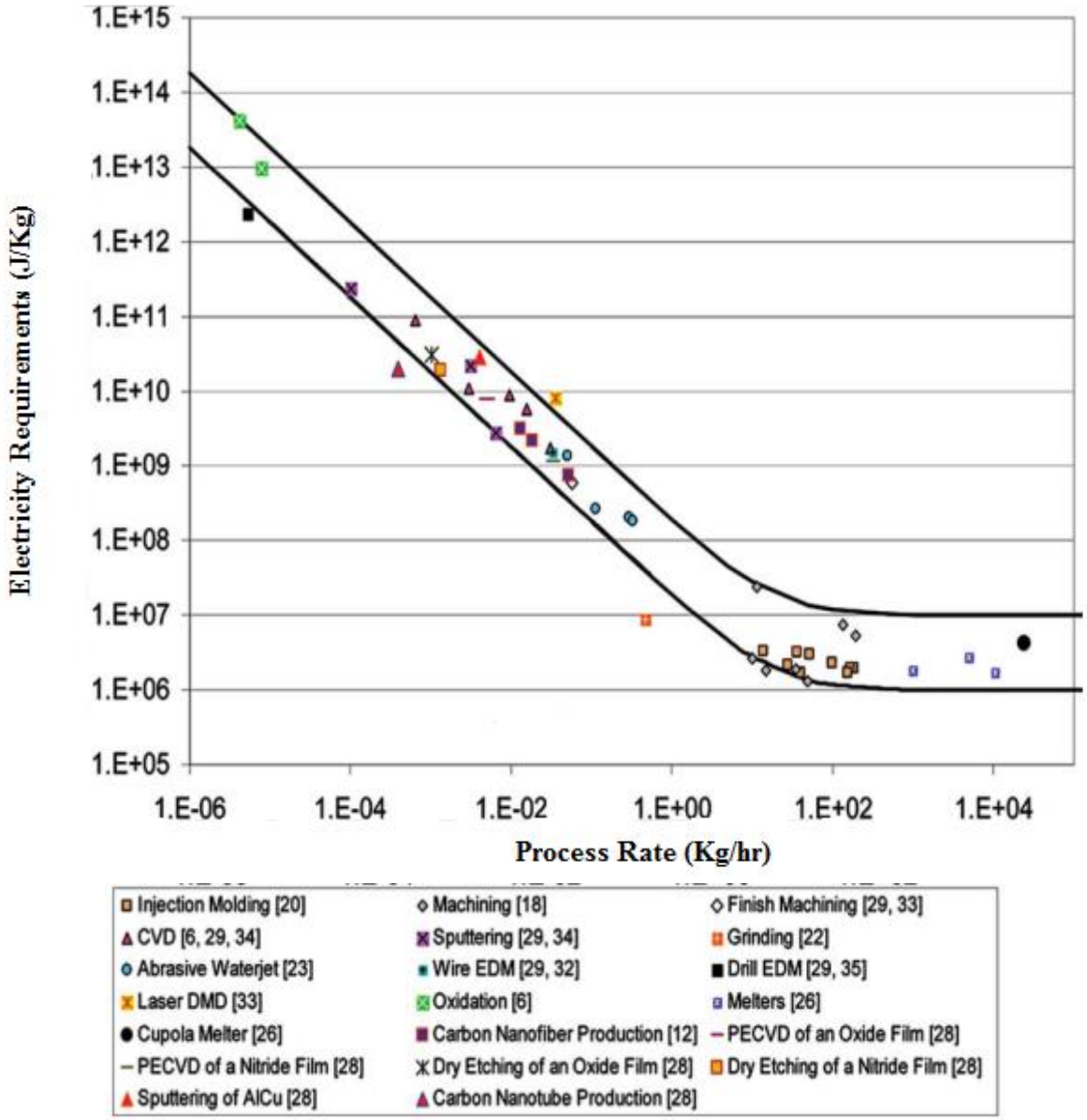


Figure 1.13. *Besoin en électricité pour les procédés de fabrication (Gutowski, 2001)*

La technologie est considérée parmi les piliers importants pour le développement des notions d'éco-fabrication en usinage. Parmi les procédés les plus développés dans ce cadre on constate : l'usinage cryogénique et l'usinage avec jet à haute pression. Le développement de ces procédés a été à travers la modélisation et l'optimisation au niveau de la lubrification en termes de quantité et qualité. (Cakir. O et al, 2007).

L'usinage cryogénique représente une méthode innovante pour le refroidissement de la zone de coupe caractérisée par une température élevée lors de la fabrication. Cette technique de refroidissement est basée sur l'utilisation des liquides cryogénique sans danger sur l'écologie pour la lubrification. L'azote est le liquide cryogénique fréquemment utilisé. On constate aussi d'autres fluides tels que : Hélium, Hydrogène, air, Oxygène (Aznijar et al, 2010). L'azote dans le système d'usinage cryogénique s'évapore rapidement et remonte dans

l'atmosphère sans laisser aucun résidu qui peut contaminer la partie outil, pièce ou l'opérateur et en éliminant ainsi les coûts de son élimination.
L'usinage avec jet à haute pression représente un procédé novatrice permettant la lubrification avec un jet d'huile ou d'eau à une haute pression qui peut aller jusqu'à 300 MPa. (figure.1.14).
Avec la progression du développement de ces techniques d'usinage, les questions qui se posent : comment, où, quoi et en quelle quantité le fluide cryogénique doit être appliqué pour améliorer les performances de l'usinage en terme d'écologie et gain économique. Dans ses travaux, (Pusavec et al, 2009) ont proposé une étude comparative entre ces deux techniques par rapport à l'usinage conventionnel (figure.1.14).

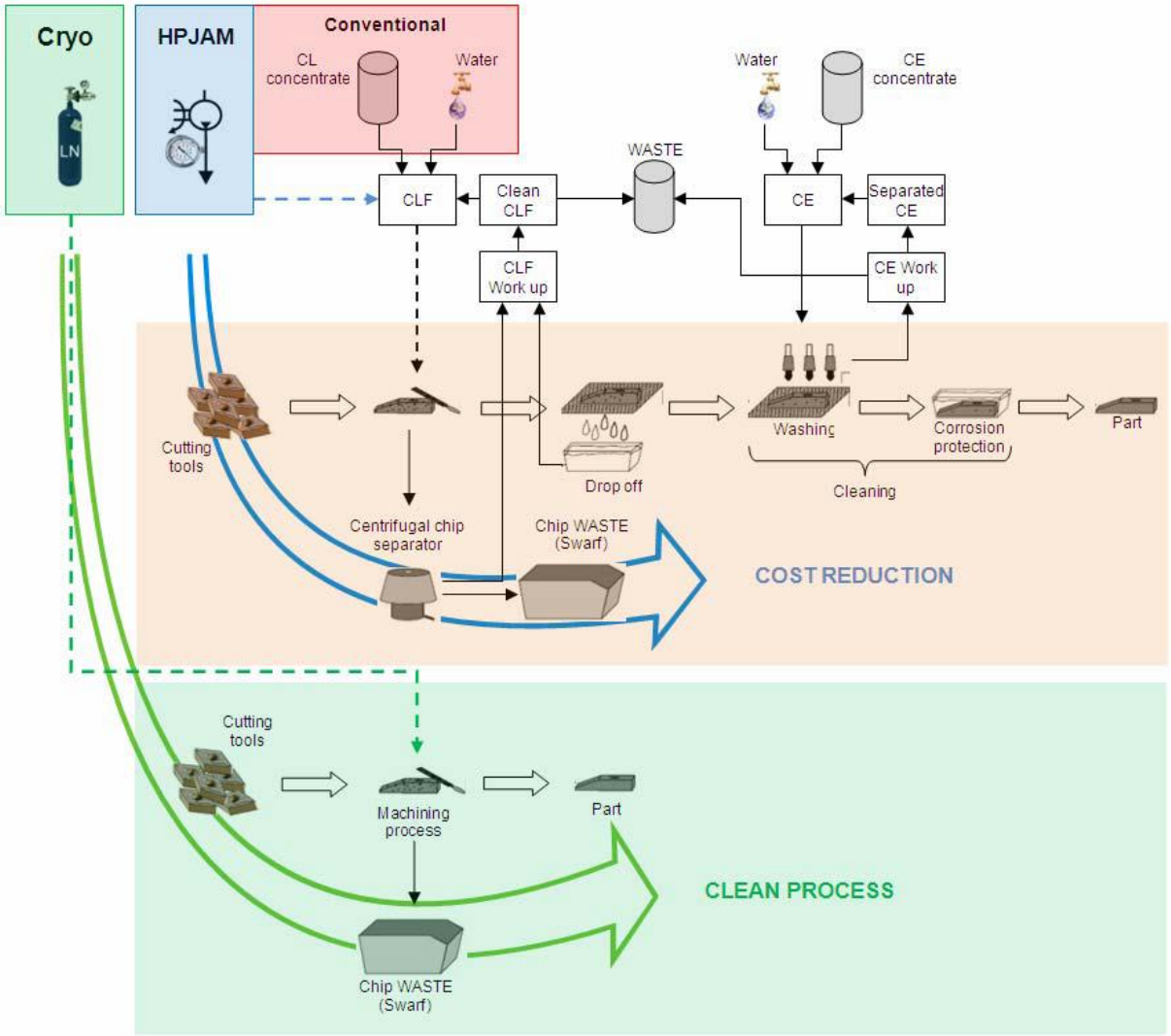


Fig.1.14. Comparaison des différents procédés (Kopac. J, 2009)

La figure 1.14 résume les points de comparaison entre les différents procédés étudiés. La réduction du coût de la production ainsi que l'utilisation des procédés propres représentent les deux axes d'étude développés dans ce travail.

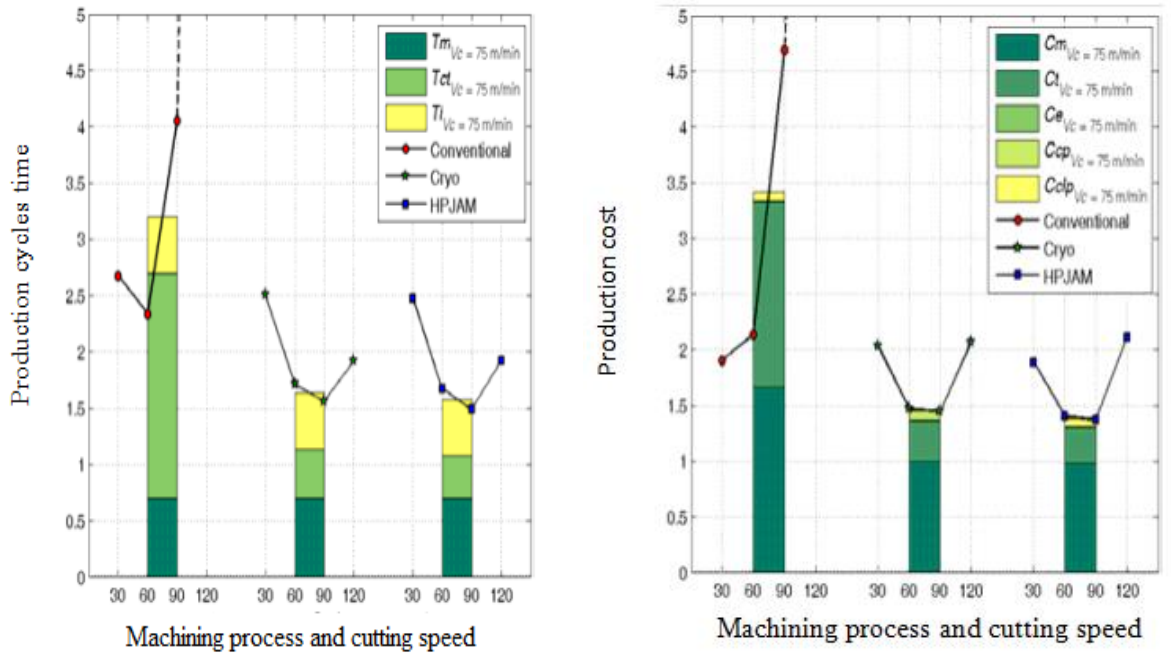


Fig1.15. Comparaison du coût de production et du temps de production (Kopac. J, 2009)

Le travail de comparaison présenté dans la figure 1.14 met l'accent sur le gain écologique ainsi qu'économique. Ce dernier a été illustré au niveau de la durée de vie de l'outil, le coût de production ainsi que le temps de production.

Les résultats montrent que l'usinage cryogénique ainsi que l'usinage avec jet à haute pression ont le temps de production minimal ainsi que le coût minimal de production. Ces résultats, comme le montre la figure 1.15, ont été validés pour certains paramètres de coupe et sous différentes conditions de coupe.

Les résultats montrés dans la figure 1.15 montrent les performances de l'usinage cryogénique ainsi que celui avec jet à haute pression par rapport à l'usinage conventionnel. Ces performances s'illustrent au niveau du coût et de temps de la production. Ce gain économique est accompagné d'un gain écologique vu que ces deux procédés minimisent l'impact écologique du lubrifiant.

4.2. Modélisation de l'éco-fabrication à base énergétique

Selon (BEER, 2009), au Royaume-Uni, l'industrie manufacturière représente 34% de la consommation de l'énergie électrique

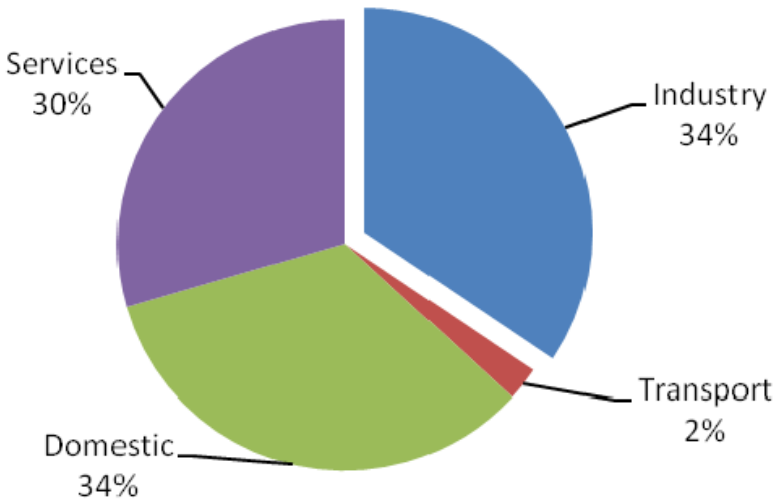


Figure 1.16. *Répartition de la consommation d'énergie par secteur en Royaume-Uni (Beer, 2009)*

.

Avec l'augmentation des prix d'énergie ainsi que la croissance importante de la demande industrielle d'énergie, les travaux de recherche ont mis l'accent sur la modélisation de la consommation d'énergie au niveau des machines ainsi que l'influence des procédés utilisés.

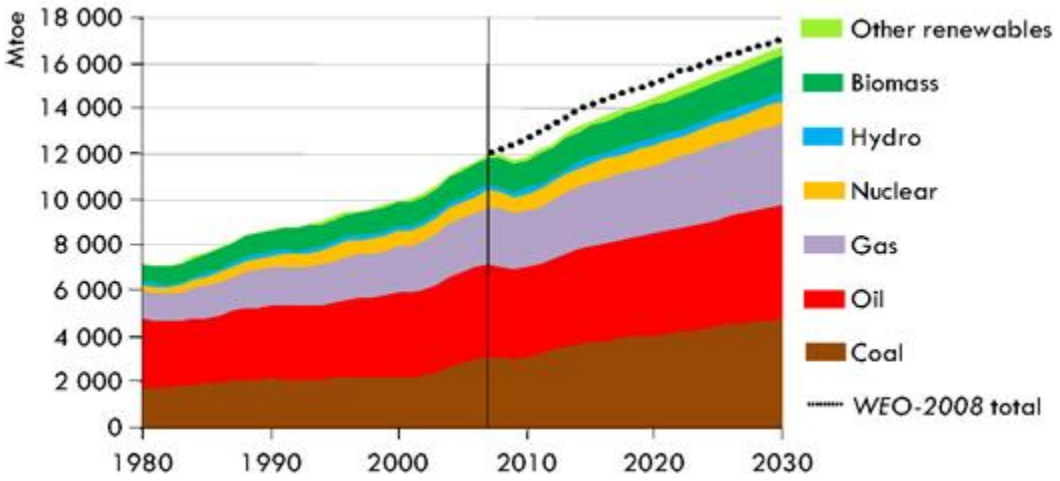


Figure 1.17. *Consommation d'énergie (Pusavec et al, 2010)*

(Pusavec et al, 2010) a constaté que l'énergie représente un facteur clé dans la modélisation de l'éco-fabrication et la réduction des émissions environnementales d'un procédé de fabrication.

Les travaux dans ce cadre ont mis l'accent sur les opérations d'usinage. La modélisation a pris en considération le comportement de la machine, l'efficacité d'utilisation de l'énergie en se basant sur l'évolution des paramètres technologiques des opérations étudiées.

Les premiers travaux datent depuis 2002 par les études développées par Gutowski et Kordnowy. Ils ont modélisé la consommation de l'énergie à partir des éléments fonctionnels

de la machine durant le cycle de fabrication : servos, pompe, moteurs… (Gutowski et al, 2006; Dahmus et Gutowski, 2004; Kordonowy, 2002).
Ainsi (Dietmair et Verl, 2009 a,b)) ont présenté un modèle global pour la consommation d'énergie au niveau d'une machine de fabrication dans le but de maîtriser l'aspect énergétique de l'ensemble machine/outil.
(Devoldere et al, 2007; Hauschild et al, 2005; Jovane et al, 2003.) ont étudié l'impact environnemental dû à la consommation d'énergie ainsi que l'efficacité opérationnelle énergétique.
De même, au niveau de l'usinage, les émissions liées à la fabrication des outils de coupe représentent des émissions indirectes liées au produit étudié. Donc, la minimisation des impacts environnementaux pendant la fabrication des outils de coupe permet la réduction de l'impact final suite à la production du produit fini (Vijayaraghavan et Dornfeld, 2010).
(Avram et Xirouchakis, 2011) ont étudié le besoin en énergie pour la broche et les axes de mouvement dans les machines pour définir la consommation énergétique durant les différents régimes de fonctionnement.
(Mori et al, 2011) ont classifié l'énergie pendant un cycle de fabrication en une énergie constante et autre variable dépendant des paramètres opératoires. L'objectif a été l'aide à la décision pour minimiser l'empreinte écologique de l'utilisation de l'énergie.
D'autres études ont été consacrées pour certains procédés spécifiques de fabrication. (Rajemi et al, 2010), Draganescu et al, 2003) ont modélisé la consommation d'énergie pour certains procédés de fabrication : tournage, fraisage… dans le but d'étudier l'influence du process ainsi que les outils, le matériau utilisé sur l'empreinte écologique. Ces études ont été basées sur des données expérimentales permettant la validation des résultats théoriques.
Ainsi, une étude menée par (Dahmus et Gutowski, 2004) sur trois machines différentes de fraisage avec différentes capacités de l'équipement auxiliaire, ont montré que suivant le modèle de la machine entre 48% - 69% de l'énergie consommée est constante quelle que soit la charge (figure 1.18). Ils ont classé la consommation d'énergie au démarrage, comme pour les ordinateurs, les fans et moteurs déchargés que "les opérations constantes de démarrage» et de l'énergie utilisée pour la position matériaux et des outils de charge que les «opérations Constant Run-time". Il est prévu qu'à l'avenir une plus grande automatisation et un nombre croissant d'équipements d'usinage intégré signifieraient un plus grand pourcentage de la consommation d'énergie auxiliaire. Comme on le voit dans une autre étude portant sur un grand centre d'usinage Toyota, on a constaté que jusqu'à 85,2% de l'énergie utilisée par l'équipement d'usinage est constante, indépendamment de la production (Gutowski et al, 2005).

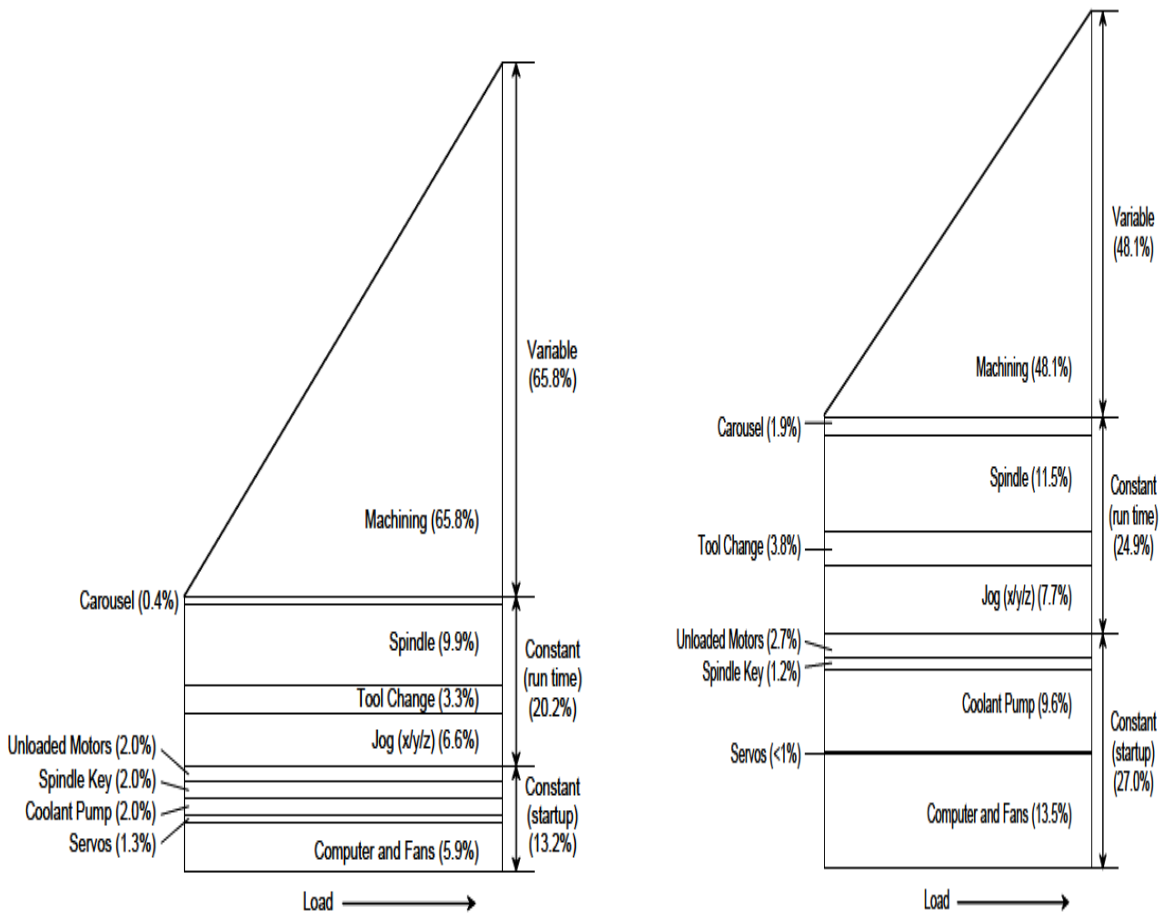


Figure 1.18. *Consommation d'énergie pour plusieurs machines de fraisage (Dahmus et Gutowski, 2004)*

La consommation d'énergie variable est en fonction des paramètres de traitement. (Diaz et al, 2009) ont modifié la vitesse d'avance pour un processus de coupe et ils ont trouvé que l'énergie par unités fabriquées a augmenté à des vitesses d'avance inférieures. Cela a également été vu lors de l'utilisation de l'usinage à grande vitesse par rapport à l'usinage conventionnel principalement en raison de la diminution du temps d'usinage qui a compensé la légère augmentation de la puissance nécessaire pour l'usinage à grandes vitesses. (Rajemi et al, 2010) ont trouvé que la vitesse de coupe et par conséquent les temps de cycle ont fortement influencé la consommation d'énergie des machines. Ce travail a été appliqué pour trois pièces. Ils ont été usinés sur un tour à des vitesses de coupe différentes. Suite à cette étude de cas, les auteurs ont constaté que le pourcentage de la consommation d'énergie pour le processus d'usinage réel augmente avec la vitesse de coupe.

(Seow. Y et Rahimifard. S, 2011) ont proposé un modèle basé sur EPE (Embodied Product Energy) pour étudier la consommation d'énergie pour la fabrication d'un tel produit. Ces travaux ont regroupé l'énergie en somme de 3 types : l'énergie directe (ED), l'énergie indirecte (EI) et l'énergie théorique (ET). Les auteurs ont appliqué cette approche pour la fabrication d'un coude. Les modèles mathématiques ont été implantés en parallèle avec l'interface *Arena*. Ainsi, l'impact de la consommation énergétique pour ce travail a été illustré à l'aide des analyses de cycle de vie.

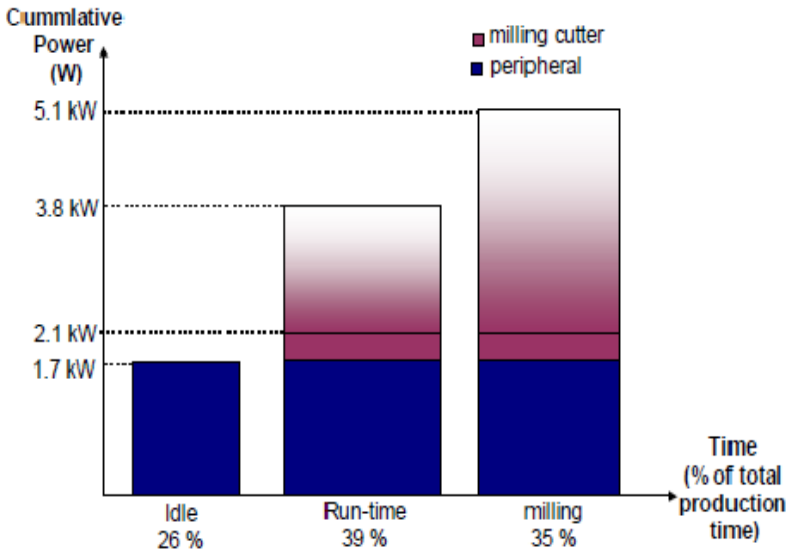


Figure 1.19. *Suivie de la consommation d'énergie par mode de production (Devoldere et al, 2007)*

L'algorithme implémenté pour résoudre cette problématique de modélisation énergétique est représenté par la figure 1.20 :

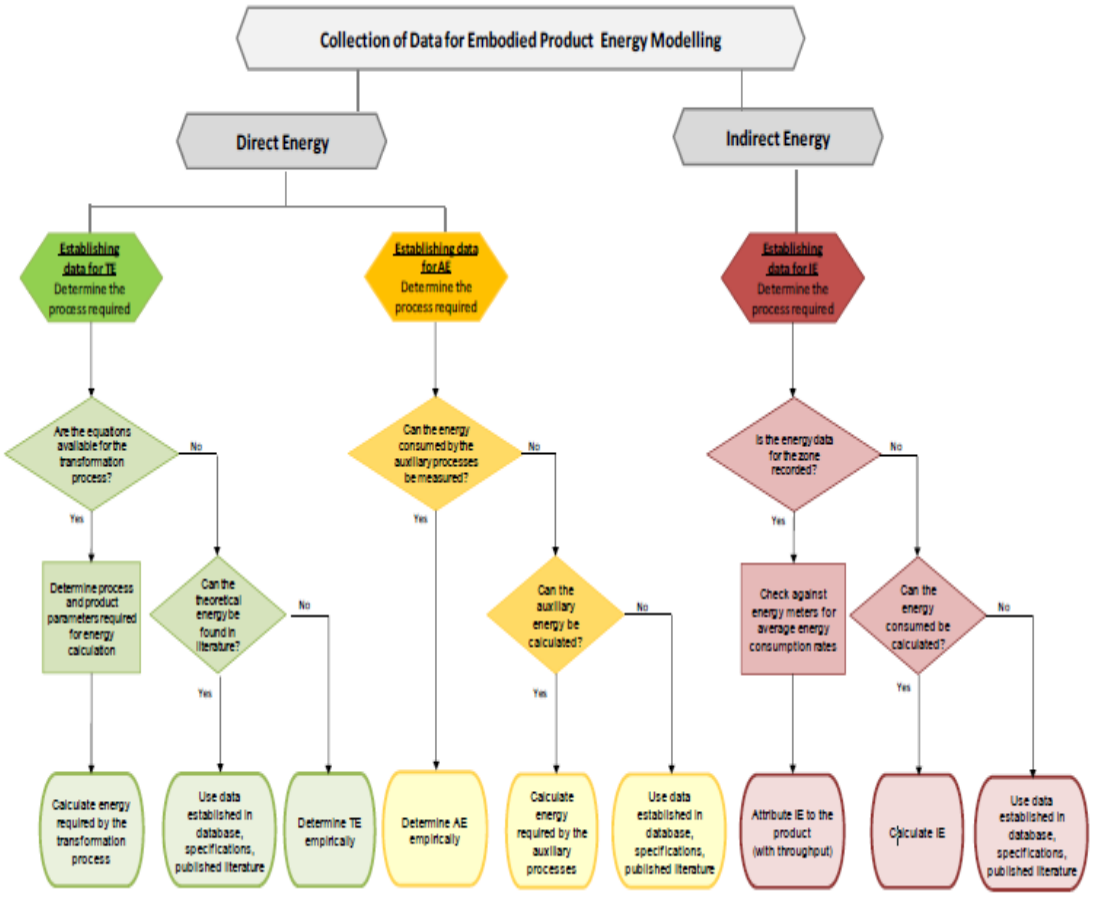


Figure 1.20. *Collection des énergies à base du modèle EPE (Seow. Y et al, 2011)*

Ce modèle est basé sur 3 éléments : le processus, la chaine de production ou système global de production et le produit étudié. Suite à la modélisation de la consommation d'énergie, la continuation de ce travail consiste en l'étude de la minimisation des émissions dégagées de la fabrication d'un produit. Cette minimisation tend à améliorer l'efficacité d'utilisation de l'énergie produite à la chaine de fabrication du produit.

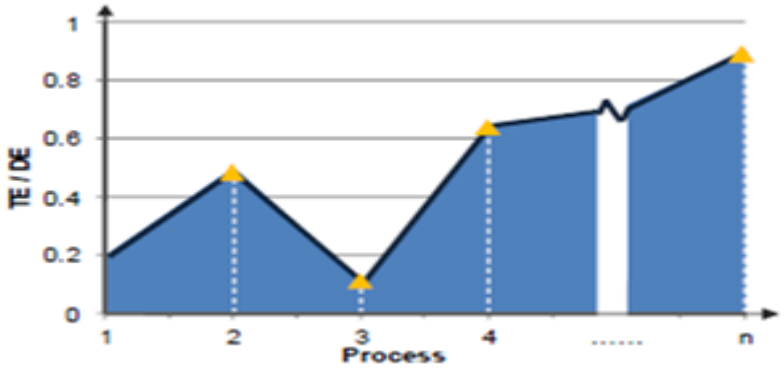


Figure 1.21. *Ratios d'efficacité énergétique des processus (Seow. Y et al 2011)*

4.3. Modélisation de l'éco fabrication à base de la consommation des ressources

La fabrication représente la phase de transformation de la matière première en s'appuyant sur des processus de fabrication et en utilisant de l'énergie ainsi que des matériaux auxiliaires.
Pour plusieurs auteurs le bilan de matière est l'un des points clés pour la modélisation de l'éco-fabrication.
(Gutowski et al, 2009) ont présenté un cadre thermodynamique pour la consommation des ressources matérielles ainsi qu'une prise en considération des conditions énergétiques.
(Xue et al, 2007) ont introduit un modèle d'agrégation de modèles d'entrées-sorties matérielles au niveau des processus pour former un modèle d'entrée-sortie matériau combiné à un système de fabrication qui permet l'identification des possibilités de réduction des impacts environnementaux au niveau des processus.
Une nouvelle méthode d'analyse a été présentée par (Jiang et al, 2008) pour agréger la consommation des ressources et l'impact environnemental au niveau du processus sur la base de modèles de processus d'introduction en bourse pour former un modèle entrée-sortie combiné pour les procédés de fabrication.
(Tan et al, 2002) ont aussi établi un modèle d'analyse de la situation des ressources matérielles de produits consommés dans les systèmes de production basés sur la description de la classification des ressources de l'état de la ressource consommée dans les systèmes de production et l'analyse de la logistique des produits. Ils ont également développé une méthode d'évaluation et un cadre technologique pour les impacts environnementaux des procédés de fabrication de composants sur la base d'un modèle IPO.
Pour le développement de la notion de 6R (Peiling. L, 2010) a proposé la solution de la réutilisation du produit ou de quelques parties dans les prochains cycles de vie dans l'objectif d'améliorer la gestion de la consommation et l'utilisation des matériaux lors de la phase de fabrication. (Vinoth. S et Rathod. G, 2010).

4.4. Notion de la fabrication à basse émission de carbone (LCM)

La notion de l'éco-fabrication est accompagnée toujours par une quantification écologique. Dans ce sens, certains auteurs ont mis en évidence la généralisation de l'aspect environnemental pour parler d'un seul indicateur qui est le carbone.

Le concept de la fabrication à bas carbone (LCM) est apparu dans la dernière décennie. LCM se réfère à un processus de fabrication qui produit une intensité totale faible des émissions de carbone et utilise l'énergie et les ressources avec efficience et efficacité au cours du processus (Tridech, 2008).

Le concept essentiel de LCM est d'abord établi sur la base du concept de fabrication durable et le principe de l'analyse du cycle de vie (ACV). D'autre part, l'évaluation des émissions de dioxyde de carbone de chaque étape de la chaîne de processus doit être conforme à BSI: normes 2008 en utilisant les facteurs d'émission alloués par rapport à la quantité de la consommation d'énergie (British-Standards-Institute 2008).

Ball en 2009 a proposé le modèle conceptuel initial de LCM au niveau de l'entreprise. L'idée principale de ce modèle est de présenter la mise en œuvre des technologies pour la production d'énergie renouvelable à l'endroit approprié dans le système de fabrication en utilisant l'approche de modélisation IDEF0.

La hiérarchie du flux d'énergie de l'ensemble de l'entreprise peut être analysée. En outre, la méthode systématique pour utiliser les déchets comme source d'énergie renouvelable est également présentée dans ce modèle. Toutefois, ce modèle est uniquement considéré comme un modèle qualitatif qui n'est pas classé comme la modélisation dynamique. À ce titre, l'évaluation et la validation par simulation et méthodes qualitatives sont nécessaires pour ce modèle selon l'auteur (Ball, 2009).

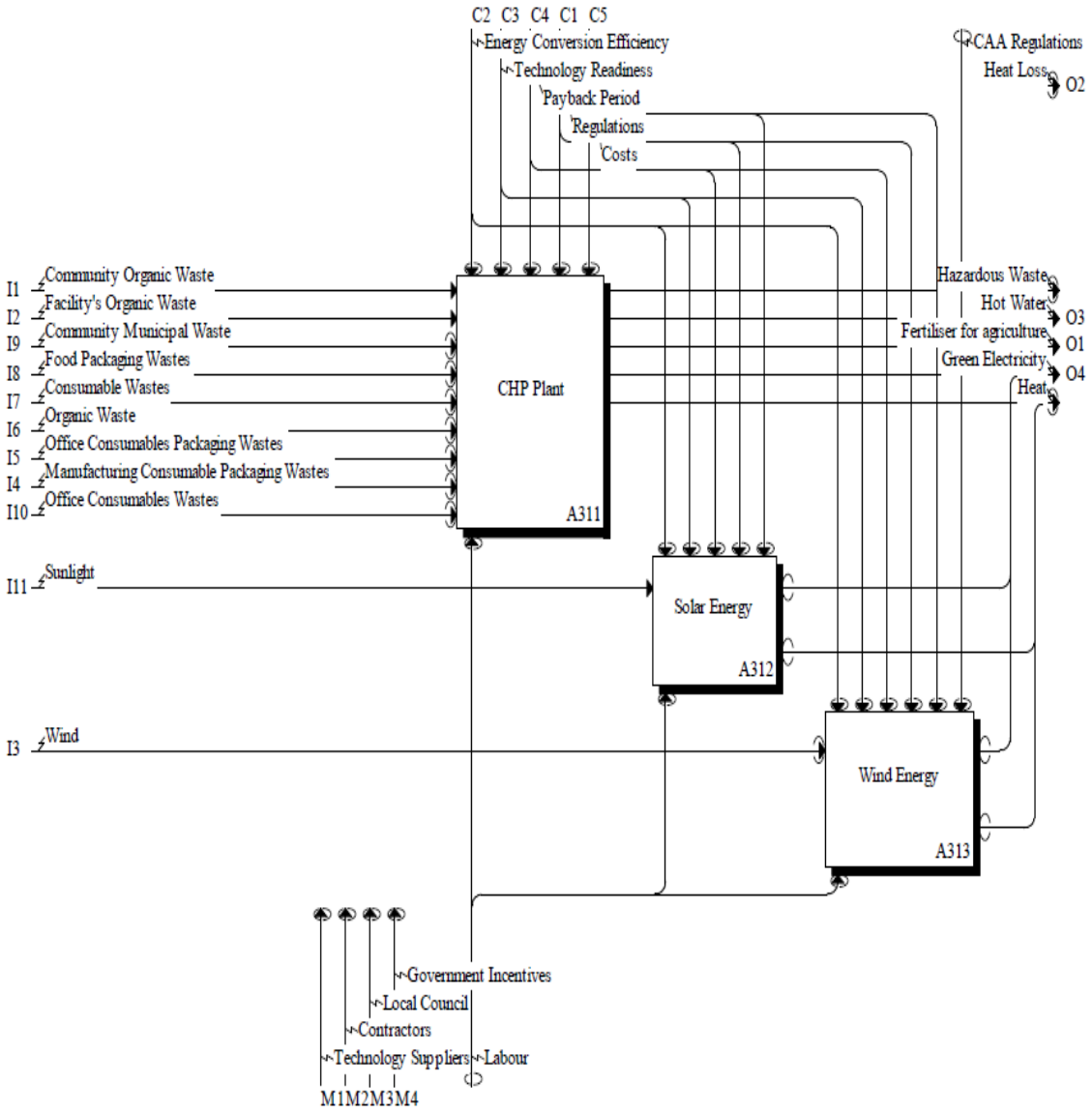


Figure 1.22. *Modèle conceptuel pour la fabrication à zéro carbone (Ball, 2009)*

De même (Song, 2010) a présenté une autre modélisation pour LCM. Le modèle incorpore l'estimation des émissions de GES pour chaque étape de la conception du produit en utilisant le bilan matériel (BOM). En outre, la figure 1.22 illustre le système intégré entre les bases de données d'émissions SGH de composantes et de la structure de la nomenclature du produit. L'objectif de ce système est de chercher la sélection des composants / pièces qui peuvent satisfaire la cible des émissions SGH. Si la solution choisie n'atteint pas l'objectif, un autre ensemble de composants / pièces va se conformer à l'exigence de la capacité du client et la production sera assurée jusqu'à ce que la solution ait à l'objectif (Song, 2010).

(Gutowski, 2006) a proposé un cadre de modélisation pour le procédé de fabrication. Comme le montre la figure 1.23, la modélisation des flux des entrées-sorties des processus de fabrication sera basée sur les éléments suivants : produits, déchets et perte d'énergie.

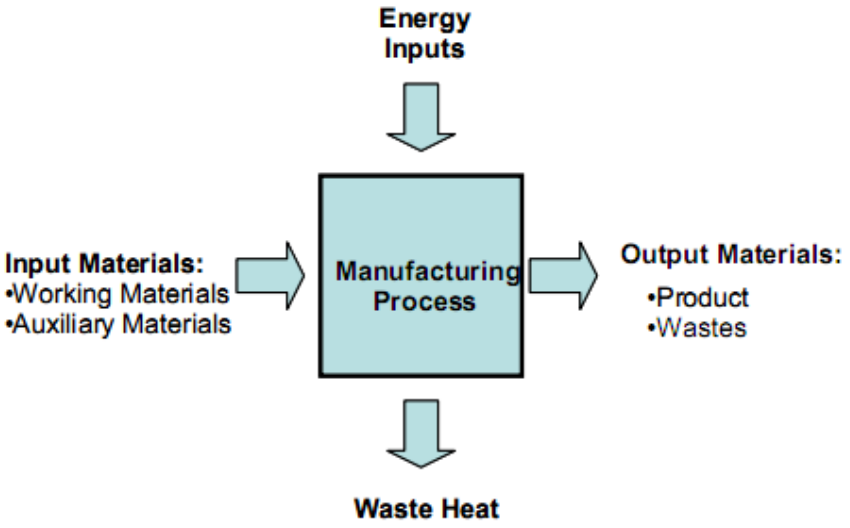


Figure 1.23. *Les entrées sorties d'énergie et matériaux d'un processus de fabrication (Gutowski, 2006)*

Ainsi, l'estimation et l'évaluation de l'impact environnemental d'un système de fabrication appelé ACV a émergé. La clé de cette méthode est l'identification des besoins en produits tels que l'énergie, les matériaux et les émissions et les déchets rejetés dans l'environnement (Heilala, 2008).

L'approche holistique de l'ACV pour une plate-forme européenne est présentée dans la figure 1.24. Au-delà de l'avantage de l'ACV, la ligne directrice pour l'évaluation du montant de l'empreinte carbone est construite, elle est appelée "PAS 2050" par British Standards (BSI 2008).

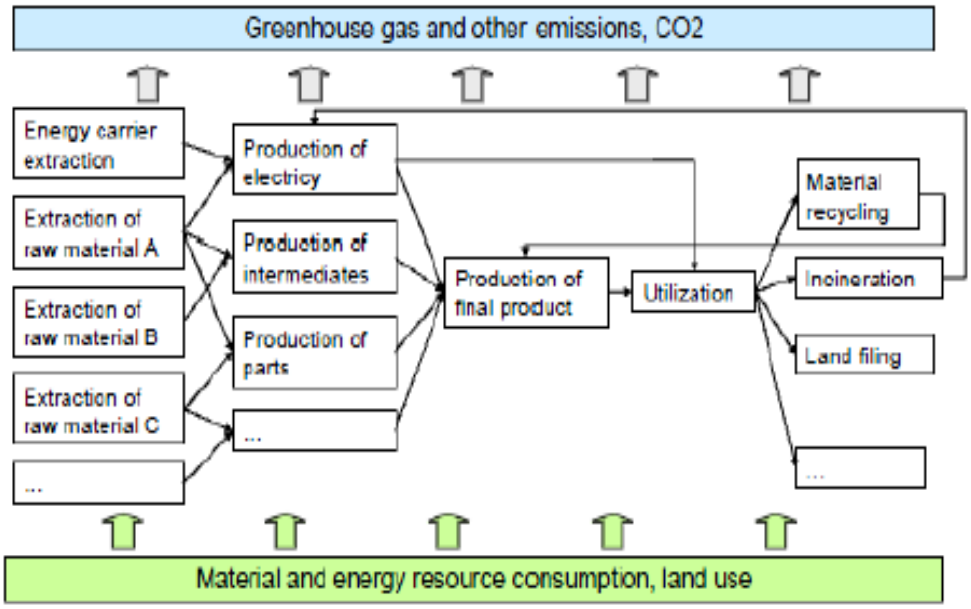


Figure 1.24. *Cycle de vie des produits à base de la plateforme EU-LCA (Heilala, 2008)*

Cette méthode concerne spécifiquement la source de GES alors que le LCA comprend tous les impacts environnementaux. Pour la première étape de la réduction de l'empreinte carbone, il est très important de comprendre l'origine des émissions de carbone. Dans la figure.1.24, l'exemple de calcul des émissions de dioxyde de carbone à l'aide de PAS2050 est présenté à l'aide du transport de blé dans la production de farine.
Chaque activité de cet exemple est classée et fournit des données d'activité et doit être alors multipliée par un facteur d'émission approprié. Le résultat de ce calcul représente les émissions de dioxyde de carbone dans les unités en kg de CO_{2e}. Cependant, il n'existe pas encore d'approche systématique pour la fabrication à faibles émissions de carbone spécifiquement pour la fabrication à base de CNC aujourd'hui même si la recherche de la réduction des émissions de dioxyde de carbone est largement développée.

5. Les techniques et méthodes d'optimisation

Un problème d'optimisation est défini comme étant la recherche d'un optimum (minimum ou maximum) d'une fonction donnée. Dans de nombreux cas, les fonctions à optimiser sont accompagnées d'un nombre de contraintes qui évoluent dans une partie de l'espace de recherche. On parle dans ce cas des problèmes d'optimisation sous contraintes.

La classification des problèmes d'optimisation rencontrés dépend des critères suivants :

- Le nombre des variables de décision.
- Le type des variables de décision.
- La formulation du problème.
- Le type de la fonction objective.

La résolution des problèmes d'optimisation est réalisée à l'aide des méthodes et algorithmes d'optimisation qu'on peut les présenter sous la forme de deux familles : les méthodes déterministes et les méthodes stochastiques.

5.1. Les méthodes déterministes

Ces méthodes se caractérisent par une exploration systématique de l'espace de recherche. En général, elles nécessitent certaines hypothèses sur la fonction objective dont on peut citer la continuité et la dérivabilité en tout point de l'espace de recherche.

Les méthodes déterministes peuvent être classées en deux catégories principales : les méthodes locales et les méthodes globales.

Pour les méthodes locales, ils assurent la convergence vers l'optimum de la fonction le plus proche de la solution courante en explorant son voisinage. Ainsi, pour les méthodes globales, ils s'attachent à converger la solution vers l'optimum global de la fonction.

Le problème d'optimisation en fabrication a été toujours classé comme complexe vu le nombre de variables et paramètres introduits, les contraintes techniques à respecter, les objectifs à atteindre… Ce caractère difficile a poussé les chercheurs à la mise en place des méthodes d'optimisation dans le cadre de l'optimisation pour la fabrication.

(Shin et Joo, 1992) ont utilisé le programme d'optimisation dynamique dans le cadre de l'optimisation des paramètres de coupe en fraisage. L'utilisation de cette méthode montre certaines limitations pour la résolution des problèmes d'optimisation avec un grand nombre des paramètres.

(Wang, 1993) a utilisé une approche basée sur le réseau de neurone pour l'optimisation du procédé de broyage. Cependant, l'optimisation par réseau de neurones peut souvent se terminer dans des minimums locaux ou un échec de convergence vers le résultat souhaité.

(Sonmez et al, 1999) a étudié le fraisage à passe multiple basé sur le critère de maximum de taux de production en utilisant l'algorithme adopté dans les travaux de (Agapiou, 1992) (programmation dynamique et programmation géométrique) dans le cadre de l'optimisation des opérations du tournage. Bien que les résultats obtenus montrent une amélioration au niveau de la qualité des résultats obtenus, les techniques d'optimisation utilisées dans ce travail montrent un minimum local ainsi qu'un temps important pour converger.

5.1.1. Les méthodes de gradient

Historiquement, les méthodes de gradient sont considérées comme les plus anciennes parmi les méthodes d'optimisation développées. Ces méthodes sont très utiles grâce à leur simplicité de mise en place ainsi que les bons résultats trouvés dans la plupart des cas d'études.

Pour la résolution d'un problème d'optimisation à l'aide de cette méthode on procède comme suit :

- On choisit un point de départ x_0 et on calcule le gradient $\nabla f(x_0)$: ce gradient indique la direction de la plus grande augmentation de f.
- Après, on se déplace d'une quantité δ_0 dans le sens opposé au gradient et on obtient le point $x_1 : x_1 = x_0 - \delta_0 \frac{\nabla f(x_0)}{\|\nabla f(x_0)\|}$
- Ainsi, on engendre une série de points $(x_0, x_1, x_2, \dots, x_k)$ qui permet de se rapprocher de plus en plus de l'optimum : $x_{k+1} = x_k - \delta_k \frac{\nabla f(x_k)}{\|\nabla f(x_k)\|}$ avec $\delta_k > 0$ représente le pas de déplacement à chaque itération. Si ce pas est fixe, on parle de la méthode de gradient à pas prédéterminé.

L'inconvénient majeur de cette méthode est la dépendance de la convergence au choix du pas. Ceci peut conduire à un processus de résolution lent. C'est dans ce sens que la méthode de la plus forte pente a été utilisée. Cette dernière a l'avantage de libérer le choix du déplacement δ_k qui doit être calculé en minimisant à chaque itération la fonction (Chong et Zak, 2011):

$$g(\delta) = f(x_k - \delta \nabla f(x_0)). \tag{1.1}$$

5.1.2. La méthode de Newton

Cette méthode est destinée pour la résolution des problèmes d'optimisation sans contraintes. Elle consiste à utiliser d'une manière itérative l'approximation quadratique de la fonction objective f à l'itération courante x_k et de minimiser cette approximation.

L'application de la méthode de Newton nécessite les hypothèses suivantes :

- La fonction f est continue et deux fois différentiable.
- $\nabla^2 f(x^k)$ est défini positif.

Ainsi, de la même manière que la méthode de gradient, on définit la suite $\{x_k\}$ comme suit :

$$x_{k+1} = x_k - [\nabla^2 f(x_k)]^{-1} + \nabla^2 f(x^k) \quad (1.2)$$

La méthode de Newton est considérée comme puissante à cause de sa convergence rapide, en particulier si l'estimation initiale de la solution x_0 est suffisamment proche de la solution optimale.

5.2. Les méthodes stochastiques

Les méthodes déterministes ont montré leur limitation en passant à la résolution des problèmes d'optimisation difficiles tels que les problèmes à grandes dimensions. Cette limitation met en évidence le besoin aux méthodes stochastiques. Ces méthodes sont de caractère itératif où le processus d'optimisation est guidé partiellement ou totalement par un processus stochastique.

On s'intéresse dans ce qui suit à la présentation des méta-heuristiques. Ces algorithmes sont basés sur l'exploration aléatoire probabiliste d'une ou plusieurs régions de l'espace de recherche.

Cette exploration peut être guidée par des fonctions probabilistes permettant d'éviter les optimums locaux lors de l'exploration.

Plusieurs techniques d'optimisation ont été utilisées pour la résolution des problèmes de l'optimisation en fabrication. Mais, ils ont été accompagnés, dans la majorité des cas, de certaines carences au niveau de la qualité des résultats obtenus. Ce manque a été résolu par l'adaptation des méthodes méta-heuristique dans le cadre de l'optimisation pour la fabrication.

Historiquement, ces méthodes datent depuis les années 1980, et selon leur apparition on peut citer les algorithmes les plus importants : les algorithmes génétiques (1975), la méthode de recuit simulé (1983), la méthode de recherche tabou (1986), l'algorithme de colonie de fourmis (1990) et l'algorithme des essaims particulaires (1995).

5.2.1. Les algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques font partie des algorithmes évolutionnaires. Leur principe de fonctionnement est basé sur l'évolution d'une population naturelle soumise à son environnement. Cette méthode a été développée par John Hollande en 1975 et popularisée par la suite par David Goldberg (Goldberg. DE, 1998).

Le principe est le suivant : d'une génération à l'autre, les individus les plus adaptés au milieu (ceux qui ont des meilleures performances en termes de fonctions objectifs et de non-dominance) verront statistiquement leur potentiel génétique (paramètre d'optimisation) conservé (figure 1.25).

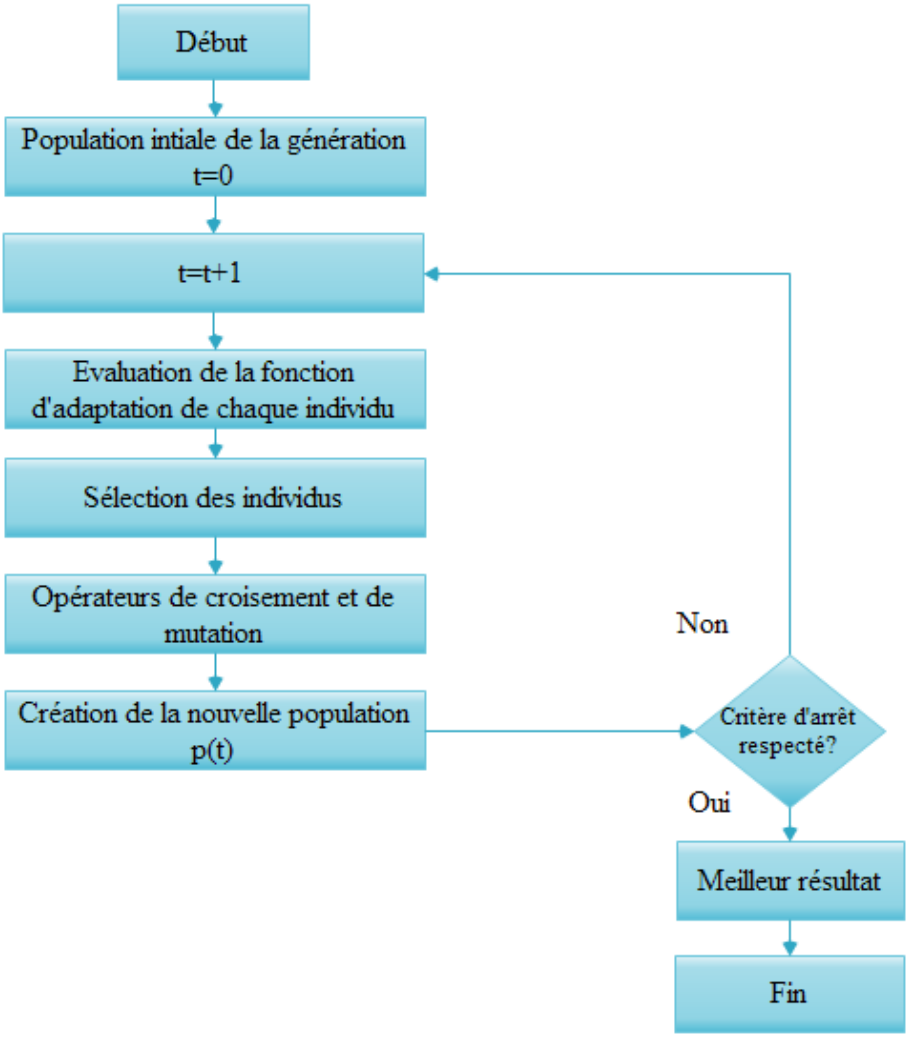


Figure.1.25. Algorithme génétique

Ces algorithmes, comme le montre la figure 1.25, sont basés sur les opérateurs suivants :

Croisement : ils permettent d'évoluer vers des individus mieux adaptés au milieu à partir d'individus performants. Cette étape a pour objectif la création de nouvelles chaînes en échangeant de l'information entre deux chaînes. Elle s'effectue en deux étapes : après l'apparition des nouveaux éléments produits par la reproduction, chaque paire de chaînes subit un croisement : un entier k représentant une position sur la chaîne est choisie aléatoirement entre L et L-1 tel que L est la longueur de la chaîne. Deux nouvelles chaînes sont créées en échangeant tous les caractères compris entre les positions k+1 et l.

Il existe un grand nombre d'opérateurs de croisement, les plus classiques dans le cadre de l'optimisation stochastique sont : le croisement à un point, le croisement à deux points et le croisement uniforme (figure1.26).

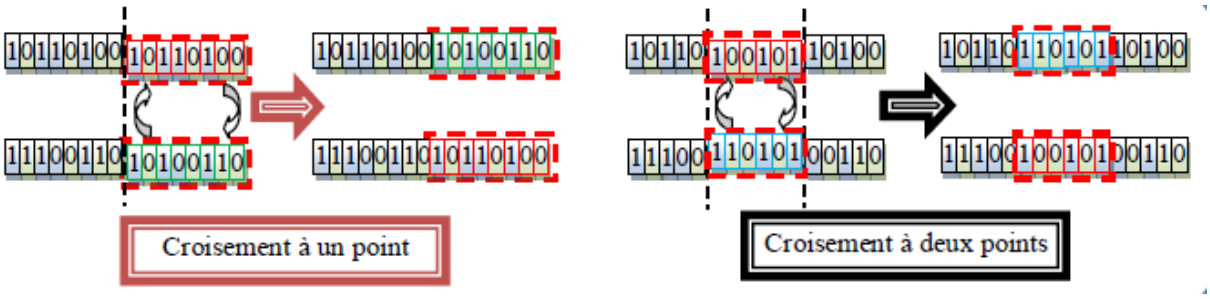


Figure.1.26. *Opération de croisement (Nabil. M, 2012)*

Mutation : elle donne de nouvelles pistes vers des types d'individus inexistants et potentiellement performants. Elle est appliquée sur une seule chaîne. Elle consiste à la modification aléatoire et occasionnelle de faible probabilité de la valeur d'un caractère de la chaîne. Cette étape introduit la diversité dans le processus de recherche des solutions et peut aider l'AG à ne pas stagner dans un optimum local.

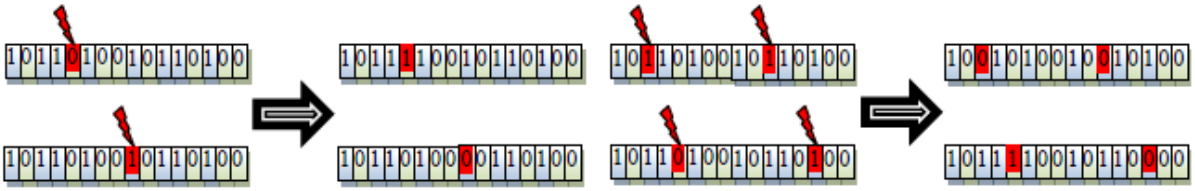


Figure.1.27. *Opération de mutation (Nabil. M, 2012)*

Codage : il permet de conserver les individus les mieux adaptés à l'environnement. Pour les AG, le codage est représenté sous forme d'une chaîne de bits contenant toutes les informations nécessaires pour la représentation d'un point dans l'espace de recherche.

Parmi les codages possibles, on distingue le codage binaire, mais il a pour inconvénient que deux points proches dans l'espace des variables ne sont pas nécessairement codés par deux chaînes de bits voisines.

Cet inconvénient amène à l'utilisation du codage de 'Gray' qui conserve une distance de Hamming de « 1 » entre deux chaînes. Cette distance est définie comme étant le nombre de bits qui diffère de l'une à l'autre.

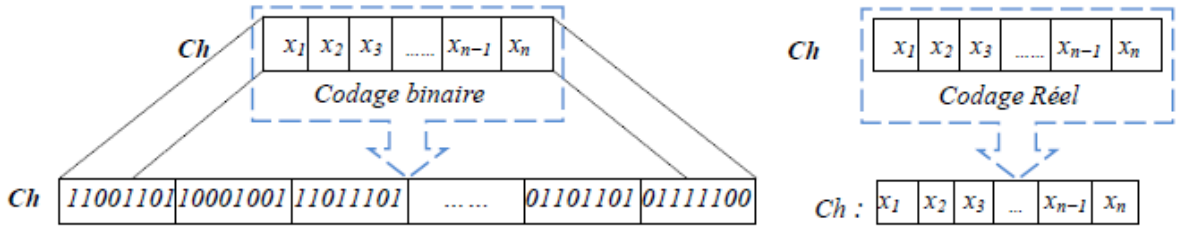


Figure.1.28. *Opération de codage (Nabil. M, 2012)*

(Shunmugam et al, 2000) ont utilisé l'algorithme génétique pour l'optimisation des paramètres de coupe en fraisage en adoptant le coût total de production comme fonction objectif. Cet algorithme possède des avantages par rapport aux techniques conventionnelles d'optimisation. Mais, les résultats obtenus dépendent de la taille de la population ainsi que la diversité des solutions individuelles dans l'espace de recherche.

(Lui et Wang, 1999) ont modifié les algorithmes génétiques par la définition et le changement du domaine d'exploration. Ces algorithmes ont été appliqués dans le cas du fraisage. Les résultats obtenus ainsi que la vitesse de convergence ont été meilleurs par rapport à la version initiale des algorithmes génétiques.

L'algorithme génétique a été largement utilisé par plusieurs chercheurs pour l'optimisation des paramètres de coupe en tournage. [(Onwubolu. GC et Kumalo. T, 2001) ; (Chen. KY et Chen. MC, 2003) ; (Sankar. RS et al, 2007)]. Les chercheurs ont appliqué certaines améliorations au niveau des opérateurs et paramètres de cet algorithme dans le but d'améliorer ses performances.

[(Belaidi. I, 2007) et (Chibane. H et al, 2011)] ont traité le problème d'optimisation des paramètres de coupe en tournage et fraisage en adoptant l'algorithme génétique multi objectifs 'NSGA II'.

Pour résoudre certains inconvénients des AG, plusieurs travaux ont été développés pour présenter d'autres outils dont on peut citer : l'algorithme de colonie de fourmis [(Vijayakuman et al, 2003) ; (Wang. YC, 2007)], et récemment l'optimisation par essaim particulaire [(Srinivas. J et al, 2009) ; (Yildiz. AR, 2009)].

5.2.2. La méthode de recuit simulé

C'est un algorithme inspiré d'une analogie thermodynamique basée sur la technique expérimentale métallurgique 'le recuit'. Cette méthode a été introduite par des spécialistes en physique statistique. [(Kirkpatrick et al, 1983) ; (Cerny, 1985)].

En se basant sur cette expérience, le principe de l'optimisation par recuit simulé est le suivant : la fonction objective du problème, similaire à l'énergie d'un matériau, est alors réduite au minimum, à l'aide de l'introduction d'une température fictive, qui est , dans ce cas, un simple paramètre contrôlable de l'algorithme. Pour éviter que l'algorithme ne reste piégé dans des minimas locaux, on fait en sorte que la température décroisse lentement en fonction de temps.

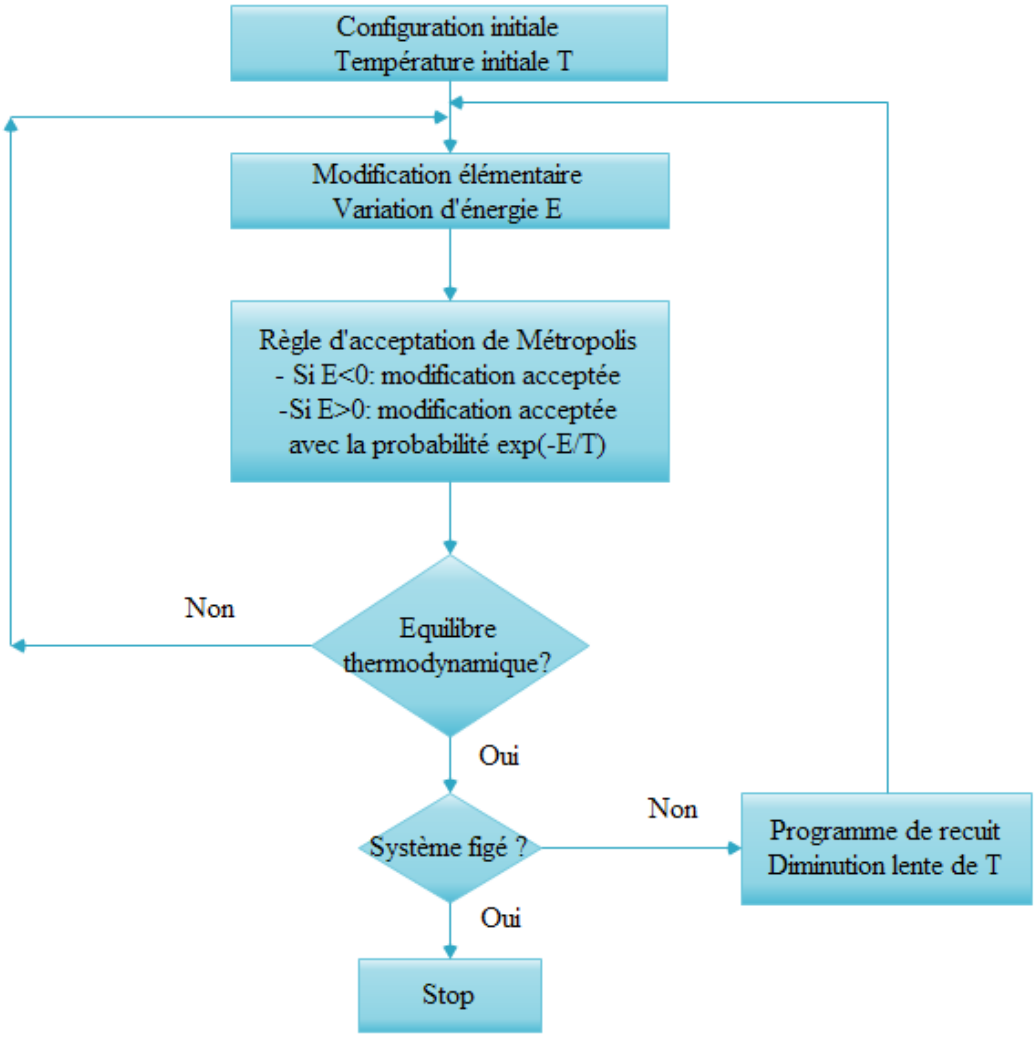


Figure.1.29. *Algorithme de recuit simulé*

La méthode de recuit simulé a l'avantage d'être souple vis-à-vis des évolutions du problème et facile à implémenter. Mais, cette méthode a l'inconvénient du besoin de nombreux tests pour trouver les bons paramètres.

5.2.3. La méthode de Recherche Tabou

En 1986, Glover a proposé une nouvelle méthode d'optimisation basée sur l'utilisation des mécanismes inspirés de la mémoire humaine. (Glover. F, 1986). Cette méthode, comme le recuit simulé, n'est pas basée sur une mémoire de tout ou mémoire globale. Le principe est les suivants : cette méthode fonctionne avec une seule "configuration actuelle", qui est mise à jour au cours des itérations successives. Chaque itération dépend de deux étapes :

- Pour passer d'une itération s à une autre t, on construit tout d'abord l'ensemble de ses voisins c.-à-d. l'ensemble des configurations accessibles en un seul mouvement élémentaire de s. on note $V(s)$ l'ensemble de ces voisins cherchés.
- Ensuite, on évalue la fonction objective pour chaque élément appartenant à $V(s)$. alors, la configuration est constituée de la configuration $V(s)$ dont la fonction objective est minimale.

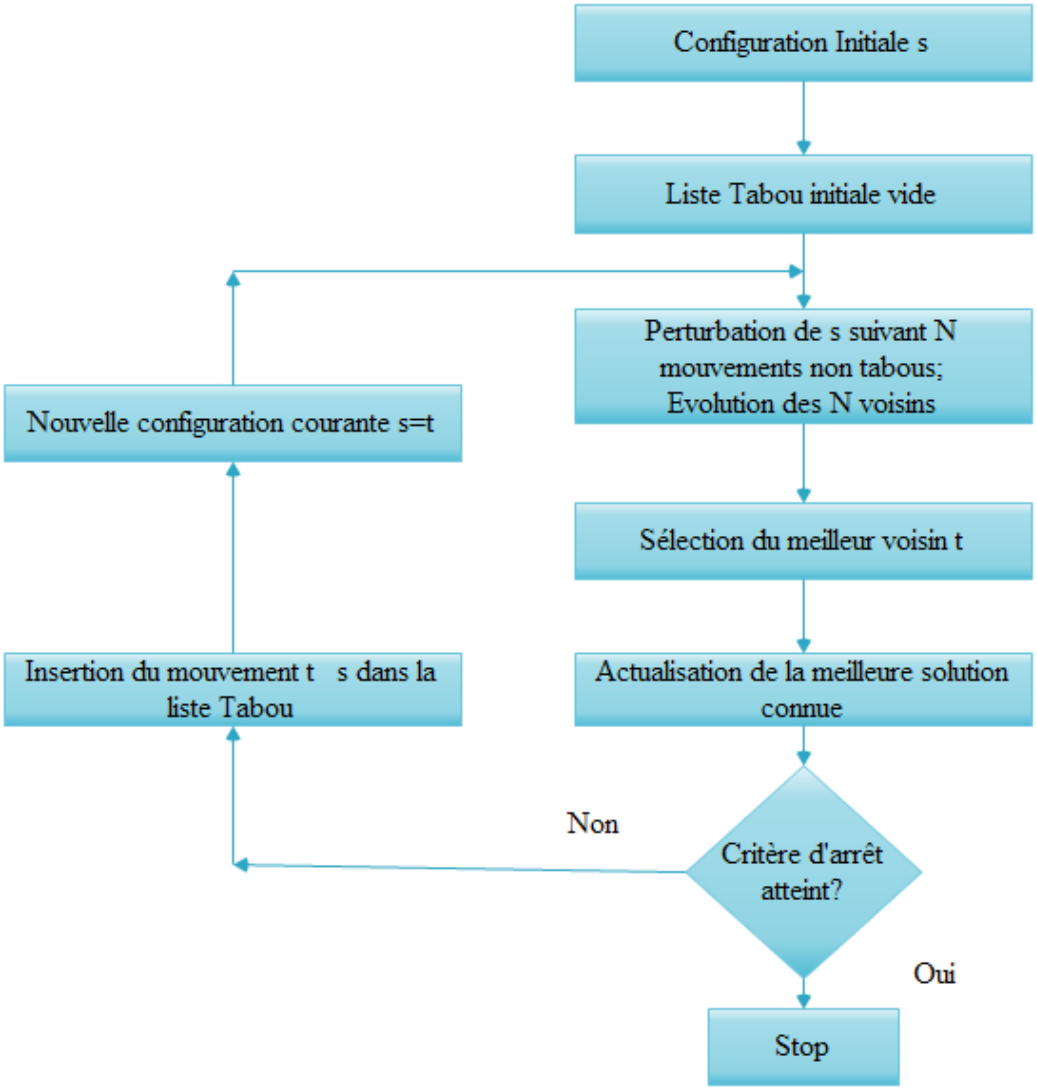


Figure.1.30. *Algorithme de la Recherche Tabou*

En suivant les deux étapes déjà présentées, on enregistre le risque de revenir à une configuration déjà visitée. Pour remédier à ce problème, il faut mettre à jour la liste des mouvements interdits nommée 'Liste Tabou'. Cette dernière contient des mouvements m ($t \rightarrow s$) qui sont à l'opposé des derniers mouvements m ($s \rightarrow t$).

5.2.4. Optimisation par Colonie de Fourmis

Cette métaheuristique a été initialement développée par Dorigo et Colornie [(Colorni et al, 1991) ; (Dorigo. M, 1992)] et inspirées des études sur le comportement des fourmis réelles. [(Goss et al, 1999) ; (Deneubourg et al, 1983) ; (Deneubourg et Goss, 1989)]. Ces travaux ont mis en évidence le problème de comprendre la stratégie dont les fourmis peuvent trouver le chemin le plus court du nid à la source de nourriture et le chemin de retour. La solution a été un moyen de communication entre les fourmis qui est le dépôt d'une trace de phéromone que les fourmis cherchant le chemin arrivent à détecter.

Ce phénomène a été traduit à un algorithme d'optimisation à l'aide de certaines analogies dont on peut citer :

- Une analogie entre l'environnement dans lequel les fourmis cherchent la nourriture et l'espace de recherche du problème.
- Une analogie entre la quantité et la qualité de la nourriture et la fonction objective à optimiser.

Dans ces algorithmes d'optimisation, les fourmis artificielles possèdent une mémoire permettant la génération des solutions faisables.

À l'origine, l'optimisation par colonie de fourmis a été conçue pour résoudre le problème de voyageur de commerce. Puis (Dorigo et Gambardella, 1999), ont proposé certaines améliorations à la version de base (Dorigo, 1992) concernant certains points tels que : la mise à jour des traces, la règle de transition…

L'évolution de l'algorithme de colonie de fourmis peut être décrite comme suit :

- Chaque fourmi est placée sur une ville de départ stockée dans sa mémoire.
- La fourmi se déplace après de cette ville de départ vers une autre.
- Lorsqu'elle est à une ville i, une fourmi k choisit d'aller à une ville non visitée j avec une probabilité donnée par : $P^k{}_{ij}(t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^{\alpha} \times [\theta_{ij}(t)]^{\beta}}{\sum_{y \in N_i{}^k}([\tau_{iy}(t)]^{\alpha} \times [\theta_{iy}(t)]^{\beta}}$ si $j \in N_j{}^k$; 0 si non

avec :

$\tau_{ij}(t)$: l'intensité de la trace de phéromone dans l'arête (i, j).

$\theta_{ij}(t) = 1/d_{ij}$: Une information heuristique telle que d_{ij} représente la distance entre la ville i et la ville j.

α et β sont deux paramètres qui déterminent l'influence relative de la trace de phéromone et de l'information heuristique.

$N_j{}^k$: Le voisinage faisable de la fourmi k

La solution finale est déterminée après que chaque fourmi termine un tour. Ensuite, les traces de phéromones sont mise à jour.

5.2.5. Les essaims particulaires

Développé par Kennedy et Eberhart (1995), l'essaim particulaire est considéré comme l'un des dernières techniques méta-heuristiques. Cet algorithme est aussi inspiré du comportement des animaux (les oiseaux migrateurs).

L'optimisation par essaim particulaire est basée sur le partage de l'information entre les solutions candidates appelées particules. Ces derniers évoluent simultanément dans l'espace de recherche considéré.

L'évolution des particules dans l'espace de recherche se fait de la manière suivante : chaque particule génère une solution en utilisant son vecteur vitesse. Ainsi, chaque particule modifie sa vitesse pour arriver à une meilleure position en s'aidant de la mémorisation de la meilleure position retrouvée lors de la simulation ainsi que l'expérience des particules voisines (meilleure solution de la population).

La stratégie de déplacement d'une particule est illustrée dans la figure 1.31:

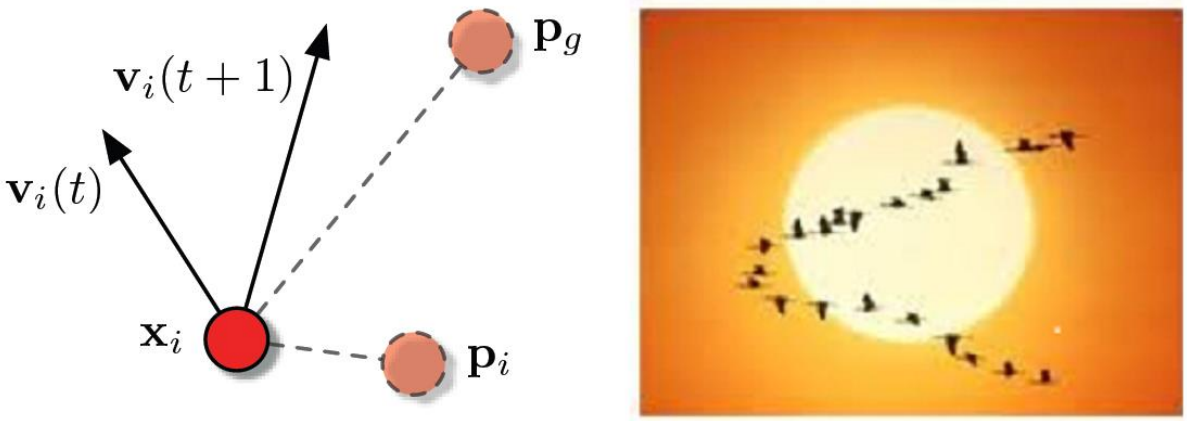


Figure1.31. *Stratégie de déplacement d'une particule au niveau des essaims particulaires*

La topologie du voisinage défini avec qui chacune des particules va pouvoir communiquer. Si l'on se réfère à la version basique de l'OEP résumée par l'Algorithme ci-dessous, la meilleure particule $p_g$est choisie à partir de la population entière, c'est une topologie entièrement connectée. Cette version de PSO est appelée version "globale" (G_{best}).
De même, on trouve aussi une version dite "locale" de l'OEP. Cette version utilise un graphe d'information circulaire. Les particules de l'essaim sont virtuellement disposées en cercle et numérotées séquentiellement à partir de 1 en parcourant le cercle. La particule n'est donc plus informée par toutes les particules.
L'algorithme de la version initiale peut être introduit comme suit :

Algorithme : Optimisation par essaim particulaire

Initialiser aléatoirement P_s particules : position et vitesse

Évaluer les positions des particules

Tant que le critère d'arrêt n'est pas atteint ***faire***

Pour i : 1,…, P_s ***faire***

Déplacer les particules selon les équations de vitesse et de position

Si $f(x_i) < f(p_i)$

$p_i = x_i$;

Si $f(x_i) < f(p_g)$

$p_g = x_i$;

Fin si

Fin si

Fin Pour

Fin Tant Que

Le critère d'arrêt peut être différent suivant le problème posé et les exigences de l'utilisateur. Si l'optimum global est connu à priori, on peut définir une "erreur acceptable" comme critère d'arrêt. Sinon, on peut fixer le nombre maximum d'itérations ou un nombre maximum d'évaluations de la fonction objectif.

(Baskar et al, 2005) ont présenté la résolution du problème d'optimisation en fraisage à l'aide de la comparaison entre 4 techniques méta-heuristiques : AG, recuit simulé, colonie de fourmis et essaim particulaire.

Les travaux présentés dans ce domaine ont assuré dans la plupart des cas le gain économique et la qualité du produit comme objectifs de leurs études. Ainsi, l'idée d'intégrer l'aspect écologique dans les problèmes d'optimisation a été récemment introduite dans les travaux de (Kai. J et al, 2012) et (Steven. H et al, 2013). Le modèle proposé dans ces travaux tend à l'optimisation des paramètres des coupes en usinage en minimisant le coût, le temps de fabrication et en tenant compte des émissions environnementales.

Conclusion

La notion du développement durable a eu une grande importance durant la dernière période. Elle a été la base de nombreux travaux ayant pour objectif la mise en place des démarches assurant cette notion.

Au niveau du secteur industriel, les travaux ont débuté par la sensibilisation des responsables pour faciliter l'avancement et organiser un cadre global pour le respect de l'environnement dans ce domaine.

Ainsi, l'éco-conception a été le mot clé au départ. À ce niveau, plusieurs travaux ont cherché des approches permettant la mise en place d'une conception respectueuse de l'écologie. L'intégration de la dimension « E » dès la phase de conception a été développée à base de l'analyse du cycle de vie. Cette démarche a mis en place le suivi et la quantification des émissions durant les différentes étapes du cycle de vie d'un produit qui sont : l'extraction de la matière première, la fabrication, l'utilisation et la fin de vie. Le résumé de ces efforts a été développé sous la forme de la norme NF E 01-005.

Suite au développement avancé de ces travaux d'éco-conception, la fabrication a été traitée comme étant l'une des phases du cycle de vie. Ce traitement a eu certains points faibles qui ont amené certains chercheurs à intégrer la notion d'Eco-fabrication.

Au départ, le développement de l'éco-fabrication a mis l'accent sur certaines études de cas au niveau de l'usinage et quelques procédés de fabrication spécifiques. Après, trois piliers ont été définis pour résoudre la problématique d'éco-fabrication : l'énergie, le matériau et le process.

On constate que la plupart de ces travaux ont été consacrés pour le développement de l'un de ces piliers déjà défini. Ainsi, pour répondre au besoin du développement durable, l'aspect économique doit être respecté dans la plupart des cas. C'est dans ce sens que s'intègrent certaines études qui ont pour objectif le couplage entre les deux aspects : écologique et économique.

Les différents travaux dans l'axe d'éco-fabrication sont à base de l'analyse de cycle de vie, mais la problématique majeure a été l'analyse des résultats ainsi que l'aide à la décision pour le fabricant.

Les travaux développés dans cette thèse auront pour objectif la mise en place d'une approche de modélisation d'éco-fabrication basée sur l'aide à la décision et le couplage entre l'aspect économique et l'aspect écologique dans le cadre d'une optimisation multi objective.

Chapitre 2 :
Approche Process Pour la modélisation de l'Eco-fabrication

Introduction

L'Eco-fabrication est définie comme étant 'la création des produits manufacturés qui utilisent des procédés qui minimisent les impacts négatifs sur l'environnement économisent l'énergie et les ressources naturelles et qui sont sans danger sur les employés, les communautés et les consommateurs'.

Cette définition met en évidence trois piliers importants pour définir la notion d'éco-fabrication : Énergie, matériaux et procédé. Ces thèmes représentent les éléments de base pour la modélisation d'une approche traitant l'intégration de l'aspect écologique dans la phase de fabrication.

Pour la modélisation de l'Eco-fabrication, deux approches sont développées :

- Une approche orientée process ayant pour objectif l'aide à la décision pour la mise en place d'un scénario de fabrication avec le minimum d'impact environnemental et le maximum de gain économique.
- Une approche orientée produite basée sur l'optimisation multi objectifs des opérations de fabrication en tenant compte des caractéristiques techniques du produit. Cette approche permet la modélisation des différentes étapes de fabrication du produit en couplant les piliers économique, écologique et technologique.

Nous traitons dans ce chapitre le cadre général de la modélisation d'éco-fabrication ainsi que la présentation de l'approche process. Cette dernière a été appliquée pour la chaîne de production de l'acide phosphorique.

1. Cadre général de la modélisation de l'éco-fabrication

La fabrication représente l'une des phases du cycle de vie traitée dans l'éco-conception. Les études développées dans ce sens tiennent compte de certains principes généraux de fabrication, mais plusieurs difficultés se présentent telles que : l'interprétation des résultats de quantification des impacts environnementaux, le couplage de l'aspect écologique et économique, l'optimisation des paramètres techniques des différents procédés de fabrication.

Le cadre global de notre approche pour la modélisation de l'éco-fabrication repose sur deux points principaux: l'aide à la décision multi critères et l'optimisation multi objectifs.

L'aspect écologique des procédés de fabrication peut se présenter sous deux formes possibles : mono critère et multi critères. En effet, à base de l'analyse de cycle de vie, les impacts environnementaux peuvent être ramenés à un seul aspect qui est globalement l'équivalent carbone. Ce dernier représente l'un des principaux gaz de Kyoto qui a été considéré comme référence pour plusieurs bases de données (Bilan Carbone). Ainsi, l'aspect multi critères est une représentation détaillée des différents impacts environnementaux

permettant de préparer une base d'information écologique. Cette dernière sert comme entrée d'aide à la décision.

L'aspect multi critères de l'éco-fabrication est à l'origine de certaines difficultés. Ces difficultés se résument à travers les différentes questions suivantes : quels sont les impacts à quantifier ? Quel est le scénario de fabrication à choisir ? Quels sont les objectifs les plus importants ? Comment peut-on pondérer les indicateurs choisis ?

Pour répondre à ces questions, les différents travaux développés dans cette thèse présentent deux approches de modélisation de l'éco-fabrication qui sont l'approche process et l'approche produit.

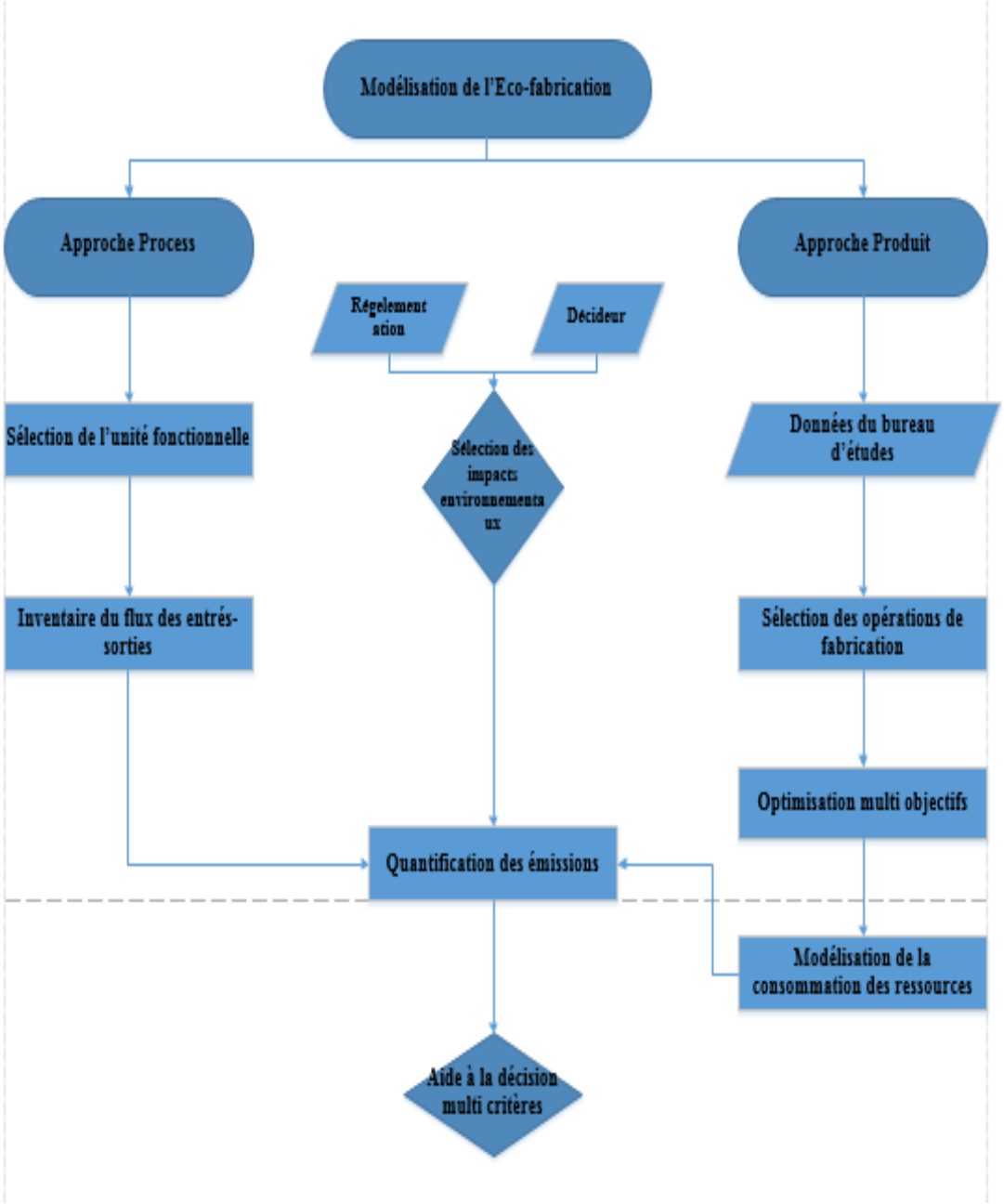


Figure 2.1. *Algorithme général de la modélisation de l'éco-fabrication*

La figure 2.1 présente l'algorithme général pour la modélisation de l'éco-fabrication. Cette dernière peut être introduite en deux niveaux possibles : la phase de fabrication pour un produit déjà en production (Approche process) et la phase d'étude du processus possible de la fabrication (Approche produit).

L'approche process basée sur l'aspect multi critères permette l'aide à la décision pour définir le scénario écologique optimal. Pour l'approche produite, l'objectif est la mise en place de l'optimisation multi objectifs dans le but de coupler la technologie, l'écologie et l'économie.

On s'intéresse dans ce chapitre à la présentation de l'approche process qui a été appliquée pour l'étude de cas de production de l'acide phosphorique au sein du groupe chimique.

2. Aide à la décision multi critères

2.1. Définition

L'aide à la décision est définie, selon (Roy. B, 1985), comme étant « l'activité, prenant appui sur des modèles clairement explicités, mais non nécessairement complètement formalisés, aide à obtenir des éléments de réponse aux questions que se pose un intervenant dans un processus de décision, éléments concourant à éclairer la décision et normalement à prescrire, ou simplement à favoriser, un comportement de nature à accroître la cohérence entre l'évolution du processus d'une part, les objectifs et le système de valeurs au service desquels cet intervenant se trouve placé d'autre part ».
À base de cette définition, l'aide à la décision peut s'inscrire dans un processus complet qui a pour objectif de résoudre un problème de décision dépendant des entrées (inputs) bien définies et en intégrant plusieurs intervenants.
Dans le cas de l'éco-fabrication, la problématique de décision est de type multi critères. Ce processus de décision dépend de plusieurs acteurs ainsi que certaines contraintes.
(Guitouni, 1998) affirme que le processus d'aide multi critères à la décision peut généralement être vu comme un processus récursif (itératif), non linéaire, composé de cinq étapes principales :

- La structuration de la situation (problème de décision).
- L'articulation et la modélisation des préférences au niveau de chaque point de vue (modélisation des préférences locales).
- L'agrégation de ces préférences locales en vue d'établir un ou plusieurs systèmes relationnels de préférences globaux.
- L'exploitation de cette agrégation.
- La recommandation.

La figure 2.2 résume le processus d'aide à la décision multi critères.

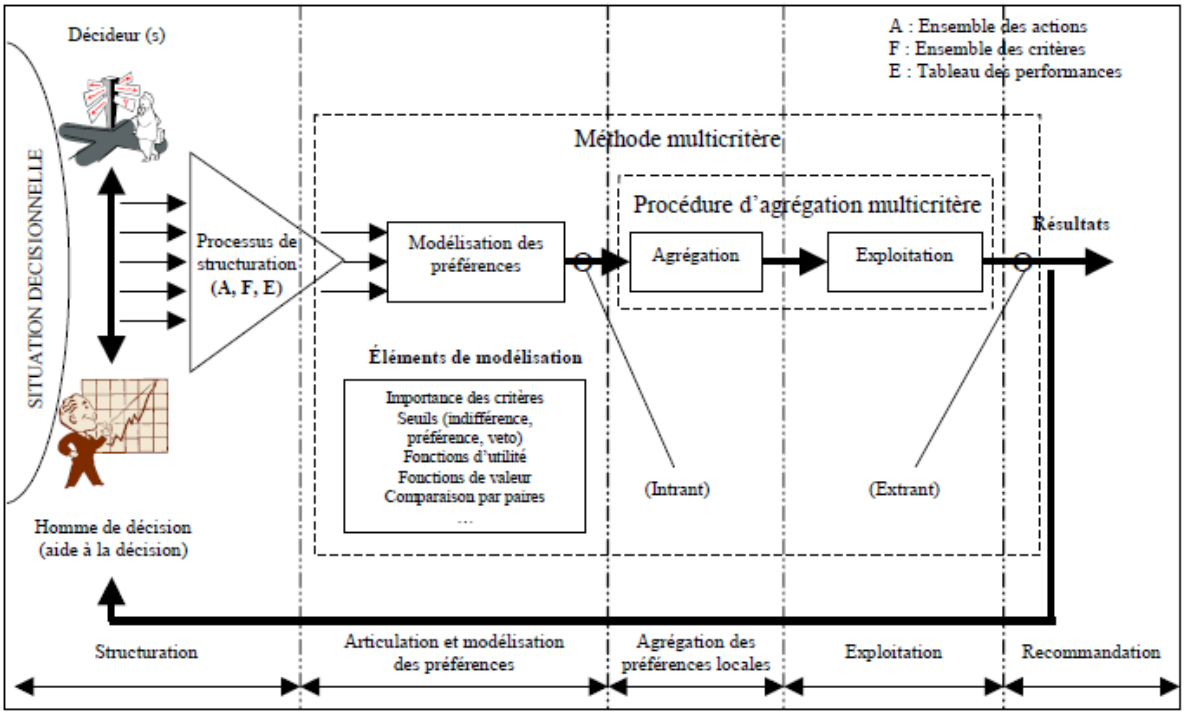


Figure 2.2. *Processus d'aide à la décision (Guitouni et al, 1999)*

2.2. Les types des problématiques de décision

Dans ses travaux (Roy. B, 1985), a regroupé les problématiques de décision en 4 types différents :

- Problématique de type α : appelée aussi problématique de choix dont l'objectif est la recherche d'une solution qui découle d'une procédure de sélection.
- Problématique de type β : il s'agit d'une problématique de tri concernant une procédure d'affectation (Modélisation de catégories).
- Problématique de type γ: elle consiste à ranger les actions selon un ordre de préférence décroissant.
- Problématique de description de type δ : Améliorer la compréhension d'ensemble de différentes actions afin de mettre en contexte les conséquences possibles des interventions

2.3. Méthodes d'aide à la décision multi critères (MADMC)

Ce type de méthode permet aux décideurs de faire un bon «choix ». Pour certains experts du domaine, ce choix existe dans l'esprit du décideur, et le processus d'aide à la décision doit le faire ressortir pour d'autres, le processus d'aide à la décision doit créer ce choix. (Caillet. R, 2003).

Selon (Roy, 1985), dans certains contextes décisionnels, une modélisation élaborée, des préférences du décideur sont requises. Selon la manière d'agrégation des préférences du décideur, il est possible de distinguer plusieurs approches :

- L'approche du critère unique de synthèse évacuant l'incomparabilité. Ces approches sont exploitées dans le cas où le décideur est capable de juger toute paire d'actions {a, b} et ce selon un des cas suivants : soit a est préférée à b, soit b est préférée à a, soit le décideur est indifférent entre a et b. Il n'y a donc pas d'incomparabilité entre deux actions.
  Parmi ces méthodes, on distingue : Technique for Order by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) [Méndez. M et al, 2006] ; Simple Multi-Attribute Rating Technique (SMART) ; Multiple Attribute Value Theory (MAVT) [Miettinen. P et Hamalainen. RP, 1997] ; Multi Attribute Utility Theory (MAUT) [Ananda. J et al, 2005] ; Analytic Hierarchy Process (AHP) [(Saaty. T et al, 2007) (Azzabi. L et al, 2008), (Ayadi. D et al 2008) ; (Ananda. J et Gamini. H, 2009) ; (Azzabi. L et al, 2010)].
- L'approche de surclassement de synthèse. Ces approches permettent l'incomparabilité entre actions. Certaines sont caractérisées par des structures de préférence fortes, faibles, indifférence, incomparabilité.
  Plusieurs méthodes ont été développées dans cette classe d'aide à la décision dont on peut citer : Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluation (PROMETHEE) [(Brans. JP et Mareschal. B, 2005) ; (Ayadi. D et al, 2010) ; (Behzadian. M et al, 2010)] ; Elimination Et Choix Traduisant la REalité (ELECTRE) [(Tayeb. L et al, 2008); (Wang. J et al, 2009)]; Measuring Attractiveness by a Categorial Based Evaluation TecHnique [Clivelle.V et al, 2006].
- L'approche du jugement local interactif. Ces approches sont caractérisées par une interaction continue entre l'homme d'étude et le décideur tout au long du processus d'aide à la décision.

2.4. Procédure de choix d'une méthode d'aide à la décision

Suite à l'étude des différentes méthodes ou approches multi critères d'aide à la décision, on constate qu'elles se différencient par :

- La façon de modéliser les préférences du décideur.
- La décision de pondération ou non des critères.
- Les attentes du décideur.

On peut conclure que ces approches dépendent des informations utilisées à l'entrée (inputs) et les résultats à la sortie (output). Donc, l'étude et la définition des inputs et des outputs permettent de classer les méthodes d'aide à la décision, ce qui aide à la maîtrise de choix de l'une de ces méthodes pour le problème étudié.

Pour résoudre ce problème (Guitouni et al, 1999), ont proposé une classification des MADMC. Ils ont défini 24 entrées et 7 sorties. Ces éléments ont été représentés sous la forme d'une matrice où les MADMC ont été placés dans les cases correspondantes.

Le tableau 2.1 représente le choix des méthodes d'aide à la décision en se basant sur les entrées disponibles et les résultats souhaités.

Tableau 2.1. *Classification des MADMC selon la matrice inputs/outputs (Hammami A. 2003)*

Inputs	Outputs						
	O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7
I1							
I2							
I3				ELECTRE IV			
I4							
I5							
I6							
I7							
I8							
I9							
I10							
I11							
I12							
I13							
I14							
I15							
I16							
I17				ELECTRE II	MACBETH	ELECTRE I	
I18			PROMETHEE II	PROMETHEE I			ELECTRE TRI
I19			EVAMIX	ELECTRE III		ELECTRE IS	
I20	MAUT TOPSIS		MAVT SMART UTA				
I21	AHP						
I22							
I23							

La classification des MADMC selon le couple (input / output) rend le choix plus facile à faire. Il suffit de se placer dans la case correspondante pour savoir qu'elles sont les méthodes susceptibles d'être appliquées au problème (tableau 2.1).

Le tableau 2.1 montre les différentes méthodes d'aide à la décision possibles selon les entrées et les données du problème (I_i) et les sorties désirées par le décideur (O_j). On présente dans les deux sections suivantes une description des différentes entrées-sorties désignées dans ce tableau de classification.

2.4.1. Caractérisation des inputs

Tableau 2.2. *Caractérisation des inputs (Hammami. A, 2003)*

Inputs	Signification
I_1	n structures $\{P_j, I_j\}$ de préordres
I_3	n structures $\{P_j, I_j\}$ de semiordres et/ou structures $\{P_j, I_j, Q_j\}$de pseudo-ordres plus des seuils de véto v_j
I_4	n fonctions d'utilité (u_j) (d'utilité (valeur) partielle) exprimées sur des échelles intervalles
I_{10}	n structures $\{P_j, I_j\}$ de semiordres et/ou structures $\{P_j, I_j, Q_j\}$de pseudo-ordres et une relation de pré-ordres complet (>) sur les attributs (critères)
I_{12}	n fonctions d'utilité (u_j) (d'utilité (valeur) partielle) exprimées sur des échelles intervalles et une relation de préordres complet (>) sur les attributs
I_{16}	n structures $\{P_j, I_j\}$ de semiordres et/ou structures $\{P_j, I_j, Q_j\}$de pseudo-ordres plus des seuils de véto v_j sur des évaluations distributionnelles plus en relation de préordres complet (>) sur les attributs
I_{17}	n structures $\{P_j, I_j\}$ de préordres plus un vecteur de coefficients d'importance relative (II) des attributs.
I_{18}	n structures $\{P_j, I_j\}$ de semiordres et/ou structures $\{P_j, I_j, Q_j\}$ de pseudo-ordres plus un vecteur de coefficient d'importance relative (II) des attributs
I_{19}	n structures $\{P_j, I_j\}$ de semiordres et/ou structures $\{P_j, I_j, Q_j\}$ de pseudo-ordres plus des seuils de veto v_j plus un vecteur de coefficient d'importance relative (II) des attributs
I_{20}	n fonctions d'utilité (u_j) (d'utilité (valeur) partielle) exprimées sur des échelles intervalles plus un vecteur de coefficient d'importance relative (II) des attributs
I_{21}	n fonctions d'utilité (u_j) (d'utilité (valeur) partielle) exprimées sur des échelles ratios plus un vecteur de coefficient d'importance relative (II) des attributs
I_{24}	n structures $\{P_j, I_j\}$ de semiordres et/ou structures $\{P_j, I_j, Q_j\}$de pseudo-ordres plus des seuils de véto v_j sur des évaluations distributionnelles plus un vecteur de coefficient d'importance relative (II) des attributs

P_j : Relation de référence stricte

Q_j : Relation de référence faible

I_j : Relation d'indifférence

2.4.2. Caractérisation des outputs

Tableau 2.3. *Caractérisation des outputs (Hammami. A, 2003)*

Outputs	Signification
O_1	Évaluation globale (un score global par exemple) : cette situation traduit la volonté de construire un critère unique de synthèse. Le score global est de niveau cardinal
O_2	Un rangement global des actions en considérant seuil d'indifférence ($\{>, \sim\}$: une structure de semiordre total) : l'introduction des seuils permet d'introduire des nuances ou limiter certains conclusions (de surclassement) par exemple.
O_3	Un rangement total des actions avec d'ex oequo ($\{>, \sim\}$: un préordre total) :l'objectif dans ce cas est souvent le rangement des actions de la meilleure à la moins bonne. Dans ce cas, toutes les actions sont comparables : il est possible de les discriminer.
O_4	Un rangement partiel des actions en considérant l'incomparabilité ($\{>, \sim, >, ?\}$: une structure de préordre partiel) : cet output reprend l'idée de l'output précédent tout en considérant qu'il est possible de ne pas pouvoir discriminer entre certaines actions : on accepte l'incomparabilité
O_5	Choix de la meilleure action ou d'un classement d'équivalence de meilleures actions
O_6	Choix d'un sous-ensemble d'actions parmi lesquelles ne trouve (nt) la (les) meilleure (s) action (s).
O_7	Tri ordonné : affecter les actions à des catégories prédéfinies et ordonnées

$\{>, \sim, >, ?\}$: {Préférence forte, Indifférence, Préférence faible, Incomparailité}

Avec les tableaux 2.2 et 2.3, on décrit les différentes entrées-sorties utilisées dans le tableau 2.1. Cette classification permet le choix de la méthode d'aide à la décision adéquate :

- **Case (I21, O1) :** Dans le cas où la situation décisionnelle exige des comparaisons par paires, c'est la méthode AHP qu'il faut adopter. Dans les autres cas, c'est la méthode de la somme pondérée. Si les préférences ont une structure floue, alors c'est la somme pondérée floue qu'il faut appliquer. Pour le choix d'une méthode parmi les autres méthodes de cette case, il faut se référer à la procédure de choix d'une méthode d'optimisation mathématique
- **Case (I20, O1) :** la méthode de la somme pondérée exige une normalisation des évaluations des actions. Elle requiert des poids d'importance pour les critères. Elle permet de calculer un score global pour toute action. La méthode TOPSIS obéit à une logique de minimisation de distance par rapport à une solution idéale. Ces deux méthodes sont

beaucoup plus simples à appliquer que la méthode MAUT. La méthode de la somme pondérée ainsi que la méthode TOPSIS exigent que les évaluations des actions soient cardinales. La méthode MAUT demeure très structurée théoriquement et elle a l'avantage de traiter des problèmes caractérisés par des informations incertaines.

2.5. Aide à la décision pour l'éco-fabrication

Dépendant de plusieurs piliers de développement, l'éco-fabrication peut être vue comme un problème multi critères. Cet aspect est à l'origine de certaines interrogations : comment on peut respecter l'écologie en tenant compte du gain économique ? Quel est le pilier le plus important ? Qu'est ce qu'on doit quantifier écologiquement ?

Dans ce contexte, plusieurs travaux ont mis l'accent sur une complémentarité possible entre les méthodes d'aide à la décision et l'analyse de cycle de vie. La méthode MAVT (Multi Attribute value Theory) a été introduite dans la phase de la définition des objectifs ainsi que pour l'évaluation des impacts du cycle de vie (Mittinen et al, 1997 ; Hertwich et al, 2001). Ainsi, la méthode MAUT (Multi Attribute Utility Theory) a été introduite au niveau de l'analyse de l'inventaire du cycle de vie [(Werner. F, 2005) ; (Werner. F et Scholz. RW, 2002)].

Les travaux présentés ont mis l'accent sur l'intégration des outils d'aide à la décision dans le cadre des analyses de cycle de vie et des démarches d'éco-conception. Pour le cas de l'éco-fabrication, les travaux présentés visent généralement l'un des piliers et ne favorisent pas une démarche structurée permettant l'intégration du concept d'éco-fabrication.

Nous constatons qu'une approche globale d'intégration de cette notion nécessite le recours aux méthodes d'aide à la décision.

Comme pour le cas de l'analyse de cycle de vie, la ressemblance et la complémentarité entre les méthodes d'aide à la décision et l'éco-fabrication sont l'un de nos objectifs pour l'amélioration et l'intégration d'une démarche d'éco-fabrication.

Cet objectif nécessite l'intégration de l'aide à la décision en deux niveaux différents de la démarche d'éco-fabrication (figure 2.1) :

- Le choix des impacts environnementaux à quantifier.
- Le choix du scénario de fabrication convenable.

2.5.1. Choix des impacts environnementaux à quantifier

La quantification des impacts environnementaux est une phase très importante pour l'évaluation écologique d'un scénario de fabrication. Une multitude d'indicateurs et catégories d'impacts ont été développés pour l'amélioration de ce champ d'études.

Suite à cette étape, plusieurs données peuvent être extraites dont plusieurs sont inutiles pour le reste de la démarche d'étude.

C'est à ce niveau qu'on a besoin d'un choix justifié de certains indicateurs d'impacts environnementaux dépendant de certains acteurs. Ces derniers s'intègrent dans la phase de décision par une agrégation ou pondération de chaque type ou catégorie.

2.5.2. Choix du scénario de fabrication convenable

Suite à la préparation des données écologiques nécessaires, les stratégies d'amélioration s'imposent pour la mise en place d'une démarche d'éco-fabrication. Ces stratégies sont à l'origine de la proposition de plusieurs scénarios de fabrication qui nécessitent un choix final. Ce scénario final tend à coupler les objectifs écologiques ainsi qu'économiques en respectant la faisabilité technique.
Ce choix dépend de certains acteurs ainsi que des contraintes techniques de faisabilité.

3. Approche process pour la modélisation de l'Eco-fabrication

Cette approche de modélisation de l'Eco-fabrication est à base d'ACV et repose sur la démarche suivante :

1) Définition de l'unité fonctionnelle.
2) Inventaire du flux des entrées/sorties.
3) Choix des critères environnementaux.
4) Quantification des émissions de la chaîne de production.
5) Aide à la décision multicritères pour le choix final du scénario de fabrication.

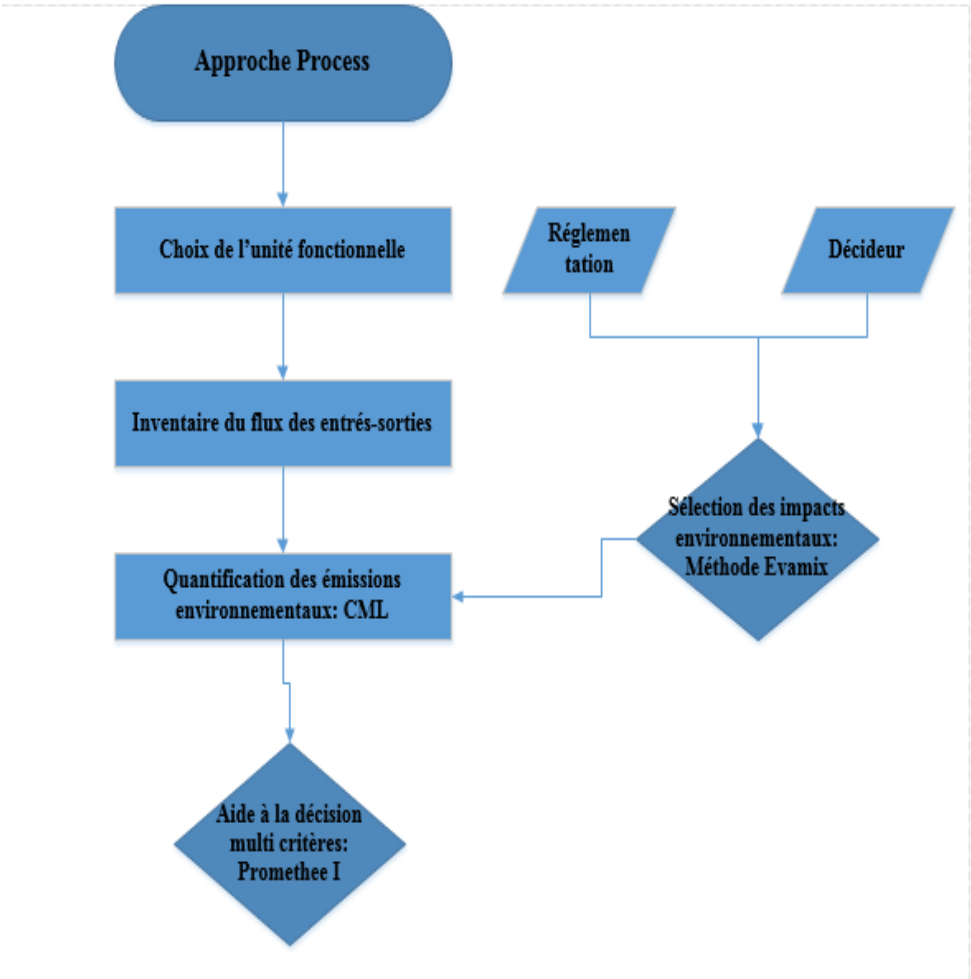


Figure 2.3. *Algorithme de l'approche process pour l'éco-fabrication*

La figure 2.3 représente l'algorithme général de l'approche process. Cette approche est basée sur les deux méthodes d'aide à la décision : *Evamix* et *Promethee I*.

3.1. Chaîne de production et unité fonctionnelle

L'unité fonctionnelle (UF) est un principe important en Eco-Fabrication. Sans l'UF il n'est pas possible de comparer les différentes alternatives d'un projet.
Elle permet d'établir une base de comparaison parmi des produits qui peuvent sous des formes très différentes (biens, services…), remplir la même fonction pour l'utilisateur.
L'unité fonctionnelle doit être une unité d'usage et non pas seulement une unité de fabrication (masse ou volume par exemple). Cette décision appartient à l'utilisateur en fonction de ce qu'il veut étudier. Une UF est d'autant plus difficile à poser que le produit est complexe. Elle est aujourd'hui une vraie connaissance métier, mais elle n'est que très rarement référencée en tant que telle.
Parmi les paramètres servant à la définition d'une unité fonctionnelle on peut citer :
- La durée de vie de l'élément et sa durée d'utilisation
- Le nombre d'éléments nécessaires pour remplir une fonction souhaitée.
- La fonctionnalité principale de l'élément et son service rendu.

Ces paramètres présentés peuvent aider aux choix d'une unité fonctionnelle dans le cas d'étude d'un problème technologique. Dans le cas d'un processus de fabrication, la cadence de production et la qualité du produit obtenu peuvent être des paramètres importants aidant à la fixation de l'UF.
L'inventaire du flux des entrées-sorties dépend de l'UF ce qui influent par la suite au niveau de la quantification des émissions environnementaux. Dans notre cas d'approche, le bon choix de l'unité fonctionnelle aide à une interprétation facile des résultats obtenus.

3.2. Inventaire du flux des entrées-sorties

Cette étape constitue la deuxième phase de l'approche. Elle consiste à quantifier les différents flux de matières, d'énergie et de polluants entrants et sortants du système. Pour cela, elle regroupe les quantités de substances polluantes émises ainsi que les ressources extraites au cours de la fabrication du produit analysé (figure 2.4).
La méthode utilisée dans ce cadre est l'approche processus : l'inventaire se calcule en multipliant les masses des divers flux répertoriés lors de l'étape précédente par des facteurs d'émission ou d'extraction. Ces facteurs, issus de bases de données, donnent la quantité de chaque substance émise ou extraite par unité d'entrant utilisé.

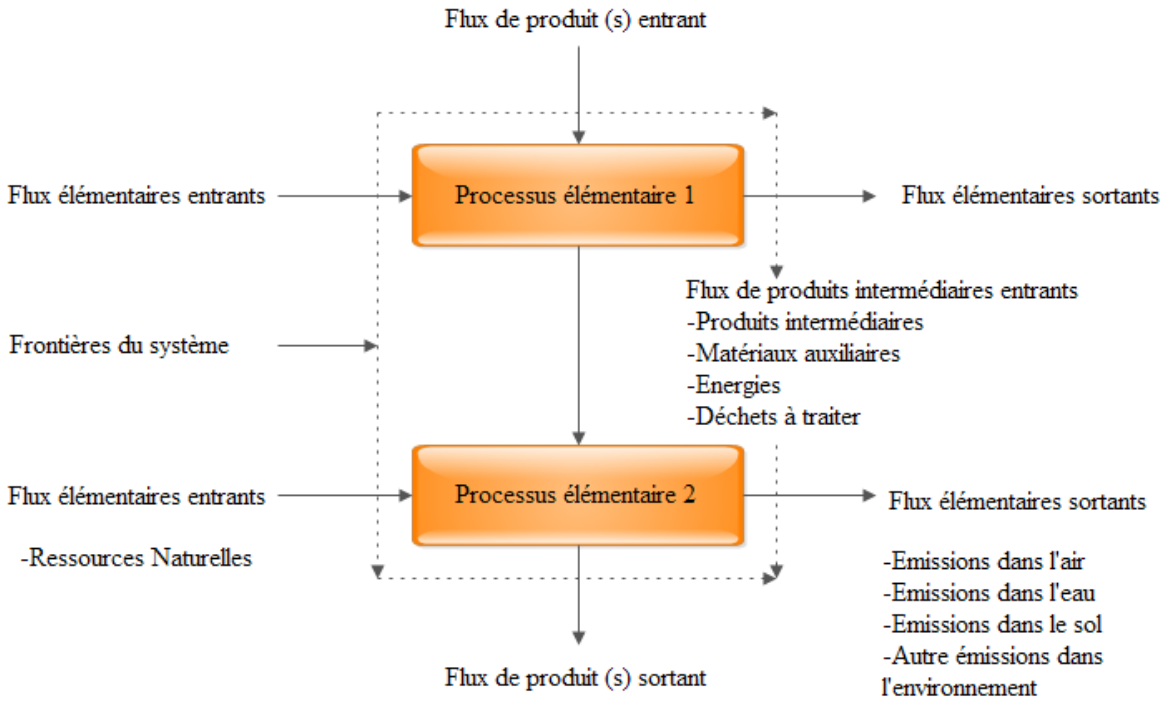


Figure 2.4. *Frontières et processus élémentaires d'un système de fabrication*

3.3. Choix des critères environnementaux

Grâce aux outils de simulation, on peut évaluer un nombre important d'impacts qui sont dans certains cas inutiles.
Donc, on se propose dans cette partie de présenter une démarche de choix des critères à évaluer pour valoriser la phase d'optimisation et d'aide à la décision.
Pour une modélisation globale de l'Eco-fabrication, on utilise la méthode CML 2001, qui est une méthode 'Mid-point' la plus utilisable. L'inconvénient majeur de cette méthode réside au niveau de la diversité des impacts proposés.
Cette diversité peut être à l'origine de certaines difficultés pour les responsables ou les utilisateurs et qui influe sur la qualité du résultat final.
Pour remédier à ce problème, on se propose de présenter une méthodologie basée sur l'aide à la décision dont le but est d'aider le responsable aux choix des impacts environnementaux à quantifier.

3.3.1. Principe

Le choix des impacts environnementaux à étudier dépend essentiellement des deux points suivants :

- Le décideur : le responsable de la production ou celui qui maîtrise la chaîne de production du produit à étudier.
- La réglementation environnementale applicable au produit.

Le décideur

Le décideur en tant que responsable de la production est appelé à noter les différents éléments nécessaires à sa décision à savoir :

- Les stratégies environnementales de la société.
- Les effluents ou rejets aperçus de la chaîne de production selon son expérience et sa maîtrise du processus.
- Les demandes des clients et les retours d'expériences.
- Le contact avec l'environnement de la société.

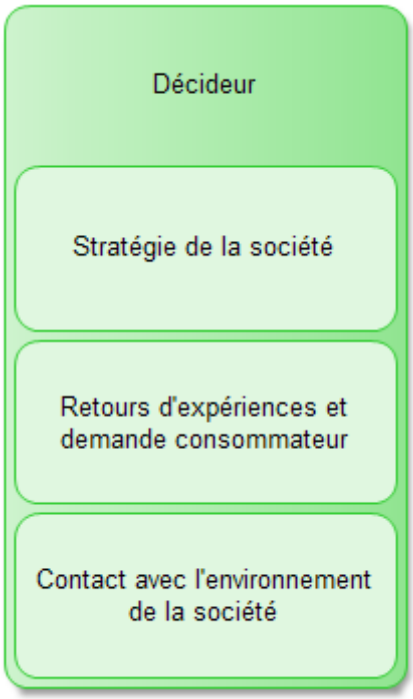


Figure 2.5. *Éléments de décision pour le décideur*

Pour chaque catégorie d'impact, le décideur doit donner une note de 0 à 4 selon l'importance accordée à ce dernier. Cette grille de notation peut être présentée comme suit :

- Note 4 : Impact environnemental considéré prépondérant.
- Note 1 : Impact environnemental a une importance relative moindre.
- Note 0 : Impact environnemental n'est pas concerné.

Réglementation environnementale

Selon la nature du produit à fabriquer, certaines réglementations et directives produites sont appliquées pour organiser les industries manufacturières.

Dans notre démarche, on utilise une notation pour chaque impact résumant son importance dans les réglementations concernant ce type de produit.

3.3.2. Méthodologie d'aide à la décision

Pour notre problématique on constate la possibilité d'une combinaison entre des évaluations ordinales et cardinales. Donc, en examinant les méthodes d'aide à la décision, on remarque que la méthode EVAMIX est la méthode la plus adéquate pour la résolution de ce problème.

Méthode EVAMIX :

La méthode EVAMIX traite les évaluations ordinales et cardinales. Afin d'évaluer une action par rapport à une autre, on calcule deux indices de dominance, le premier pour les évaluations ordinales et le second pour les évaluations cardinales. Ces deux indices sont par la suite normalisés puis combinés pour donner une mesure globale de la dominance. Enfin, un score global par action est calculé, ce qui permettra de classer les actions.
Cette méthode repose sur les étapes suivantes :
Étape 1 : Calculer les indices de dominance (de l'action *i* par rapport à l'action *k*) α_{ik} et β_{ik} respectivement pour les attributs ordinaux*(O)* et cardinaux*(C)*.

$$\begin{cases} \alpha_{ik} = \sqrt[p]{\sum_{j\in O}[\pi_j.\vartheta(e_{ij},e_{kj})]^p} \\ \beta_{ik} = \sqrt[p]{\sum_{j\in C}[\pi_j.\vartheta(e_{ij},e_{kj})]^p} \end{cases} \tag{2.1}$$

Avec : $\vartheta(e_{ij},e_{kj})= \begin{cases} 1, si\ e_{ij} > e_{kj} \\ 0, si\ e_{ij} \approx e_{kj} \\ -1, si\ e_{ij} < e_{kj} \end{cases}$

Étape 2 : Normaliser les indices de la manière suivante

$$\delta_{ik} = \frac{\alpha_{ik}}{\sum_i \sum_k |\alpha_{ik}|} \tag{2.2}$$

$$\mu_{ik} = \frac{\beta_{ik}}{\sum_i \sum_k |\beta_{ik}|} \tag{2.3}$$

Étape 3 : Calculer la dominance *Dik* globale de l'action *i* par rapport à l'action *k*. C'est simplement la somme pondérée des indices de dominance normalisés.

$$D_{ik} = \delta_{ik}.\sum_{j\in O}\pi_j + \mu_{ik}\sum_{j\in C}\pi_j \tag{2.4}$$

Étape 4 : Calculer le score global par action comme suit :

$$D_i = \sum_{k=1;k\neq i}^{n} D_{ik} \tag{2.5}$$

Où n est le nombre d'actions.

D_i permet de ranger les actions.

Démarche de choix des indicateurs environnementaux :

Pour fixer les impacts environnementaux à quantifier, on suit la démarche suivante en amont de la démarche globale de modélisation pour l'éco-fabrication.

Étape 1 : Préparation de la matrice de décision qui contient une note liée au décideur et une autre liée à la réglementation environnementale.

Étape 2 : Calcul des indices de dominance (de l'impact *i* par rapport à l'impact *k*) α_{ik} et β_{ik} respectivement pour les attributs ordinaux*(O)* et cardinaux*(C)*.
Étape 3 : Normalisation des indices.

Étape 4 : Calcul de la dominance D_{ik} globale de l'impact *i* par rapport à l'impact *k*. C'est simplement la somme pondérée des indices de dominance normalisés.

Étape 5 : Calcul du score global par impact.

Après l'arrangement des impacts par ordre de priorité, on choisit parmi eux les plus importants pour les quantifier et suivre la démarche de modélisation.

3.4. Évaluation des impacts environnementaux

L'inventaire a permis de déterminer les quantités de matière et d'énergie extraites ainsi que les émissions dans l'eau, le sol et l'air. Il s'agit à présent d'évaluer leur impact environnemental, c'est-à-dire comparer une substance donnée à d'autres substances sur leur faculté à endommager l'environnement et la santé humaine.
En effet, lorsqu'une substance polluante est émise, elle évolue dans l'atmosphère : sa concentration est modifiée, elle change d'état et de milieu. Le cheminement qu'elle suit est appelé la voie d'impact. Ainsi, les méthodes d'analyse d'impact reposent sur la modélisation de ces voies d'impact en reliant les données d'inventaire aux dommages environnementaux potentiels.
Les méthodes de quantification des émissions sont regroupées en deux catégories : Mid point et End point ainsi que les monocritères et multicritères.
Quelle que soit la méthode utilisée, le calcul d'impact réalisé à partir de l'inventaire des substances intervenant dans le cycle de vie d'un produit peut se résumer par le schéma de la figure 2.6:

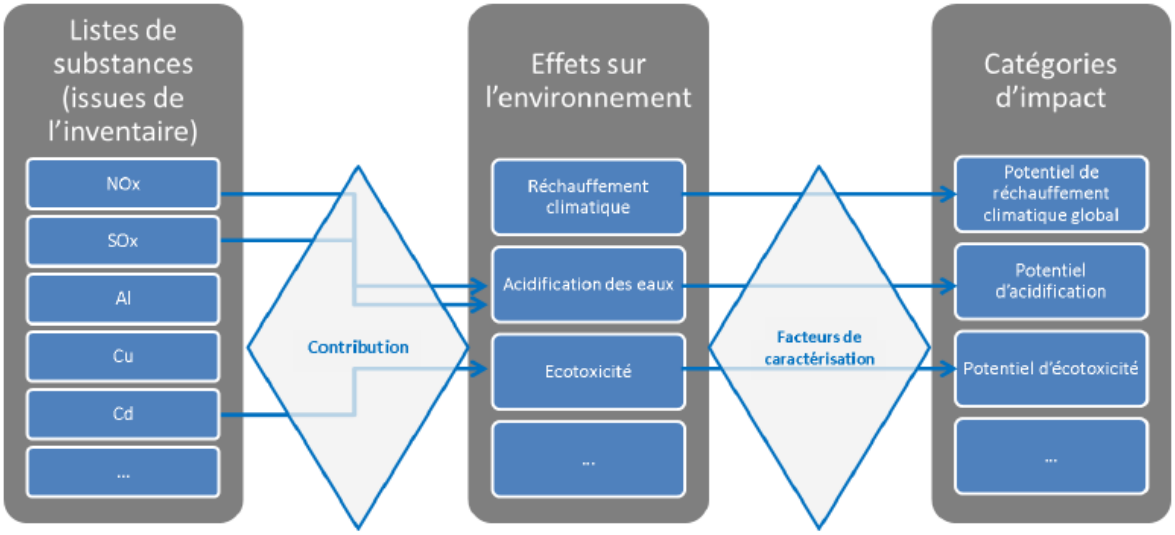


Figure 2.6. Des substances contributives à un (ou des) effet sur l'environnement vers la caractérisation des impacts (Princaud. M, 2011)

Chaque méthode de calcul d'impact attribue des facteurs de contribution à certaines substances pour différentes catégories d'impact. Entre chacune de ces méthodes, les substances, leur contribution et le facteur correspondant peuvent être différents. Ainsi, pour un même inventaire de substances, deux méthodes de calcul d'impact pourront donner des résultats différents.

Pour adopter une méthode de calcul d'impacts, une étude bibliographique approfondie a été élaborée [(Dreyer et al, 2003) ; (Pant et al, 2004) ; (Larsen et al, 2007) ; (Potting et al, 2006)].

On adopte la méthode CML 2001 pour cette étape de démarche pour les raisons suivantes :

- C'est une méthode 'Mid point' permettant d'étudier l'impact direct sur l'environnement.
- Elle prend un nombre important de substances lors du calcul d'impact.
- CML 2001 prend en compte des notions de zones d'émissions, avec une échelle continentale, voire globale pour certains indicateurs.
- Elle prend aussi en compte les notions de transferts de substances entre les compartiments.

Au niveau de la modélisation de l'Eco-fabrication, on a choisi la méthode CML pour l'évaluation des impacts ainsi que la base de données Ecoinvent.

3.5. Aide à la décision multicritères

À la fin de cette démarche, l'objectif est de déterminer un scénario de production Eco-conçu optimisé.

Mais comme c'est déjà indiqué, l'optimisation multi objectifs aboutit à une multitude de solutions possibles pour notre problème, d'où le besoin d'une méthode pour le classement final des scénarios de production.

La liaison entre l'aide multicritère à la décision et l'analyse du cycle de vie a toujours été étroite dès le début du fondement de cette dernière. Différentes approches ont été proposées afin de réaliser des objectifs qui se croisent.

À ce niveau de modélisation, les entrées sont de type I_{18} où on a la possibilité d'introduire des poids pour la pondération des actions ou des scénarios introduits. Pour les sorties ou les résultats recherchés, on ait dans le cas du type O_4. Ce dernier est le cas d'un arrangement des scénarios en comparant les critères de comparaison un par un.
Dans le cadre de notre démarche de modélisation, et en se référant à la matrice des MADMC (tableau 2.1), la méthode de sur-classement *PROMETHEE I* (Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluation) est choisie pour compléter l'étude comparative des différents scénarios de fabrication possibles.

3.5.1. Mise en place de la méthode PROMETHE I

Cette méthode établit un classement acceptant l'incomparabilité pour n actions selon k critères : on calcule, après avoir attribué un poids w_j à chaque critère, pour chaque couple (a,b) d'actions, les flux entrant et sortant de chaque nœud (action) à partir du degré de sur-classement π(a,b) :

$$\pi(a,b) = \frac{1}{p}\sum_{j=1}^{k} w_j\, F_j(a,b) \quad \text{où } p = \sum_{j=1}^{k} w_j \tag{2.6}$$

$F_j(a,b)$ est la fonction de préférence ayant les valeurs entre 0 et 1 pour les écarts.

Le flux sortant ou « puissance » :

$$\phi^+ = \frac{1}{n-1}\sum_{b\in A} \pi(a,b) \tag{2.7}$$

Le flux entrant ou « Faiblesse » :

$$\phi^- = \frac{1}{n-1}\sum_{b\in A} \pi(b,a) \tag{2.8}$$

On en déduit les situations de sur-classement, d'indifférence et d'incomparabilité suivantes :

- « A surclasse B » ou « A est préférable à B » :

À S B si $\phi_a^+ > \phi_b^+$ et $\phi_a^- < \phi_b^-$ ou

Si $\phi_a^+ = \phi_b^+$ et $\phi_a^- < \phi_b^-$ ou

Si $\phi_a^+ > \phi_b^+$ et $\phi_a^- = \phi_b^-$

- « À est indifférent à B » : À I B si $\phi_a^+ = \phi_b^+$ et $\phi_a^- = \phi_b^-$

- Si non A et B sont incomparables.

3.5.2. Problématique de pondération en éco-fabrication

Le problème de pondération est très important dans cette étape. On présente une pondération plus réaliste et plus pragmatique en attribuant plus d'importance aux impacts majeurs engendrés par les scénarios.

En effet un poids W_j est attribué au $j^{ème}$ critère. Ce poids est d'autant plus grand que le critère (aspect environnemental) est « important ».

À ce niveau de modélisation, l'importance des impacts environnementaux est relative à la pollution journalière respective d'une personne dans le monde qu'on appellera I_j.

Ainsi, plus l'impact est grand plus son poids est élevé.

Le poids est alors une fonction définie comme suit :

$$W_j = \frac{\max(I_f, f = 1,2 \dots n)}{I_j} \tag{2.9}$$

4. Étude de cas : Production d'acide phosphorique

4.1. Chaîne de Production de l'acide phosphorique

La production de l'acide phosphorique passe par les étapes suivantes :

- ***Étape 1 :*** Préparation du soufre liquide et son stockage à partir de la matière première.
- ***Étape 2 :*** Fabrication d'acide sulfurique
- ***Étape 3 :*** Fabrication d'acide phosphorique : attaque/filtration/concentration

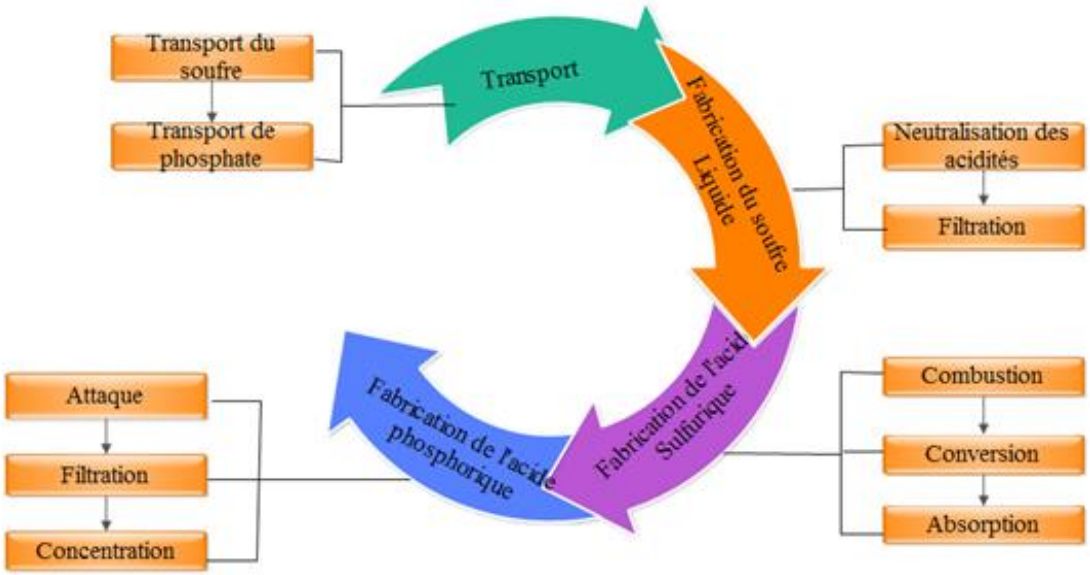


Figure 2.7. *Chaîne de production de l'acide phosphorique*

4.1.1. Préparation du soufre liquide

La matière première utilisée dans le processus de fabrication de l'acide phosphorique est à l'état solide initialement. Le soufre peut être obtenu soit à partir des déchets de pétrole ou dans les gisements. La société apporte sa matière première à l'aide des bateaux et les fournisseurs sont dans la plupart des cas : Brésil et Ukraine.
Le soufre solide est alimenté par une bande transporteuse à partir du stockage aérien avec l'addition de chaux pulvérulente pour neutraliser l'acidité résiduelle. Ainsi, le soufre subit la fusion sous agitation à 140°C, avec purge périodique des impuretés solides décantées.
Généralement, le soufre est riche en cendre et bitume d'où la nécessité d'une filtration sur toiles pour éliminer le maximum de ces matériaux :

- Cendre : Matière à base de silice caractérisée par une température de fusion élevée de l'ordre de 1500°C.
- Bitume : Matière à base d'hydrocarbures

La présence de ces matériaux augmente les pertes des charges dans le circuit.
La filtration s'effectue à l'aide de la circulation du carcel (matière à base de silice) en circuit fermé dans une fosse équipée des pompes pour la préparation d'une couche extérieure.
Finalement, le soufre liquide filtré est stocké à une température de 140°C pour être pompé par la suite vers l'unité de fabrication de l'acide sulfurique.

4.1.2. Préparation de l'acide sulfurique

La fabrication de l'acide sulfurique, comme le montre la figure 2.8, passe par les étapes suivantes :

- Combustion : $S + O_2 \Rightarrow SO_2 + 70940\ Kcal/Kmole$

  C'est une réaction exothermique, totale, rapide et irréversible.
- Conversion : $SO_2 + 1/2\ O_2 \Leftrightarrow SO_3 + 23500\ Kcal/Kmol$

  C'est une réaction exothermique, lente et réversible
- Absorption : $SO_3 + H_2O \Leftrightarrow H_2SO_4 + 32800\ Kcal/Kmol$

  C'est une réaction exothermique et instantanée.

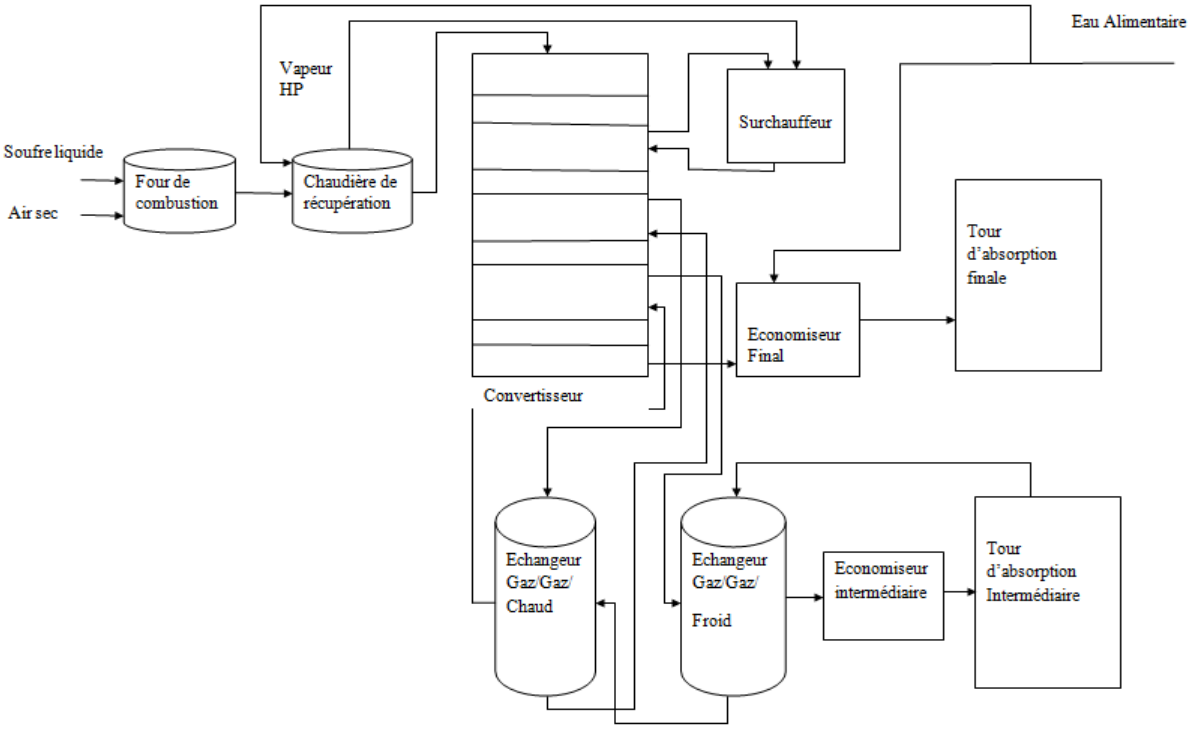


Figure 2.8. *Unité de préparation d'acide sulfurique*

La figure 2.8 présente les différents équipements de l'unité de production de l'acide sulfurique. Ces équipements sont liés à une installation de refroidissement permettant la récupération de chaleur.

La combustion

Le soufre pulvérisé dans le four à soufre brûle au contact de l'air sec envoyé depuis la tour de séchage selon la réaction suivante:

$$S \quad + \quad O_2 \Rightarrow \quad SO_2 \quad + \quad 70940\ Kcal / Kmole$$

La combustion est assurée par 4 brûleurs à pulvérisation. Ainsi, à la sortie du four, une ligne by-pass permet de court-circuiter partiellement le passage de gaz dans la chaudière.
Le débit du soufre est contrôlé par une vanne automatique sur le refoulement de la pompe centrifuge immergée. Ainsi, le débit d'air est réglé en fonction de la température du four par la variation de la vitesse de la turbosoufflante.
Le gaz quitte le four de combustion du soufre à environ 1030°C.

Conversion

Après combustion, le gaz passe à l'étape de conversion pour obtenir le trioxyde de soufre. Pour se faire, on dispose d'un convertisseur constitué de 4 masses catalytiques.
Le gaz alimente le convertisseur à environ 425°C et dans le 1er lit on assiste à une conversion d'environ 60% du dioxyde de soufre en trioxyde de soufre suivant la réaction suivante :

$$SO_2 \quad + \quad O_2 \quad \Leftrightarrow \quad SO_3 \quad + \quad 23500\ Kcal / Kmol$$

Cette réaction nécessite la présence du pentoxyde de vanadium comme catalyseur.
Le gaz quitte le 1er lit à une température légèrement supérieure à 600°C et alimente le surchauffeur où il cède l'énergie récupérée à la vapeur en provenance de la chaudière pour la surchauffer.
Ce gaz est refroidi et alimente le 2e lit à une température environ de 440°C nécessaires pour la cinétique de la réaction. La conversion de SO_2 en SO_3 est d'environ 85% à ce niveau de convertisseur.
Le gaz sort de la deuxième masse de la catalyse à une température d'environ 530°C et est refroidi dans un échangeur gaz-gaz chaud dans le côté tubes pour alimenter la troisième masse du convertisseur à une température de 430°C dont la conversion se poursuit à 98%.
Le gaz échappant du troisième lit est riche en SO_3et se refroidit en premier temps de 464°C à 281°C dans un échangeur gaz gaz froid dans le côté calandre et ensuite dans un économiseur intermédiaire qui baisse la température du gaz de 281°C à 184°C pour alimenter la base d'une colonne d'absorption intermédiaire.
Au sommet de cette dernière le gaz sort en équilibre thermique avec l'acide 98,5%qui ruissellent à une température de 83°C.
Au pied de la colonne d'absorption l'acide 99,5% sont à 114°C après absorption du SO_3 à un rendement voisin du 100%.
Le gaz sortant de la tour est à 0% SO_3 se réchauffe à travers l'échangeur gaz gaz froid dans le côté tube et puis l'échangeur gaz gaz chaud dans le côté calandre pour alimenter le 4e lit avec une température de 430°C.
Dans le quatrième lit, la couche entière de catalyseur à grande activité de manière à obtenir un taux de conversion de 99,7%. Le gaz en provenance du quatrième lit de catalyseurs à une température de 445°C passe à travers un économiseur final, où il se refroidit à une température de 160°C avant d'alimenter la tour d'absorption finale.

Séchage de l'air et absorption de SO_3

Le sécheur reçoit de la turbosoufflante le débit d'air humide nécessaire au four. L'eau correspondant à l'humidité de l'air est absorbée par un arrosage d'acide à environ 45°C dont la composition est maintenue entre 94 et 96%. L'acide dilué ruisselle à la base du sécheur à environ 70°C et 95,8% en poids, est réconcentré à 94-96% par l'arrivée d'acide à 98,5% en provenance de l'absorbeur, tandis qu'une partie de l'acide 94-96% est recyclée vers l'absorbeur avec un appoint d'eau pour maintenir la concentration d'acide à 98,5% dans le bac de circulation d'acide de l'absorption intermédiaire.
Pour la régulation de la concentration d'acide de séchage le débit d'acide 98,5% sont contrôlés par une vanne de régulation sur la ligne de transfert par la détection de la concentration dans l'acide en circulation à l'entrée de la tour de séchage.

⇨ Il y a donc un échange d'acide fort et d'acide faible entre l'absorbeur et le sécheur pour assurer la constance de leur concentration respective : 98,5 % et 94-96 %. Et sans ce double transfert, la concentration d'acide produit par l'absorbeur ne cesserait de croitre, alors que la concentration d'acide du sécheur ne cesserait de diminuer.

La totalité du débit d'air sec produit dans le tour de séchage est envoyée au four de combustion du soufre en tant qu'air de combustion pour le brûlage du soufre.
Le trioxyde du soufre produit au niveau des trois premières masses du convertisseur est absorbé dans une solution aqueuse à 98,5 % en poids de l'acide sulfurique en circulation dans la tour d'absorption intermédiaire. L'absorption due SO_3 est à contre-courant selon la réaction suivante:

$$SO_3 \quad + \quad H_2O \quad \Leftrightarrow \quad H_2SO_4 \quad + \quad 32800\ Kcal/Kmol$$

L'acide concentré par l'absorption de SO_3 quitte la tour à environ 114°C et 99,25 % en poids. Le maintien de la concentration d'acide dans le bac de circulation intermédiaire à 98,5 % est assuré par l'addition d'eau de dilution, et de l'acide sulfurique 96 % en provenance du sécheur.
La chaleur de la réaction exothermique produite par l'absorption et les différences de chaleur sensibles entre chaque courant de gaz sont rejetées dans le réfrigérant d'absorption intermédiaire par l'eau de refroidissement.
De même, le gaz en provenance du 4e lit est légèrement riche en SO_3 qui serait absorbé dans la tour d'absorption finale par un acide 98.5 % en poids. L'acide quitte la tour à environ 85°C et 98,55 %. Le rétablissement du titre à 98,5 % dans le bac d'absorption final est assuré par la dilution avec de l'eau. L'acide produit dans ce bac est transféré dans le bac intermédiaire dans une ligne de transfert dont le débit d'acide est contrôlé par une vanne de contrôle de niveau.
Le résultat de l'accumulation de l'acide dans le bac de circulation intermédiaire est pompé et refroidi à environ 45°C à travers un échangeur tubulaire, pour être envoyé au réservoir de stockage, par l'intermédiaire d'une vanne régulatrice du niveau.

4.1.3. Fabrication de l'acide phosphorique

Après la préparation de l'acide sulfurique, la chaîne continue pour la fabrication de l'acide phosphorique qui est le produit final de l'usine. Dans cette unité, 3 étapes nécessaires : Attaque, Filtration et Concentration.

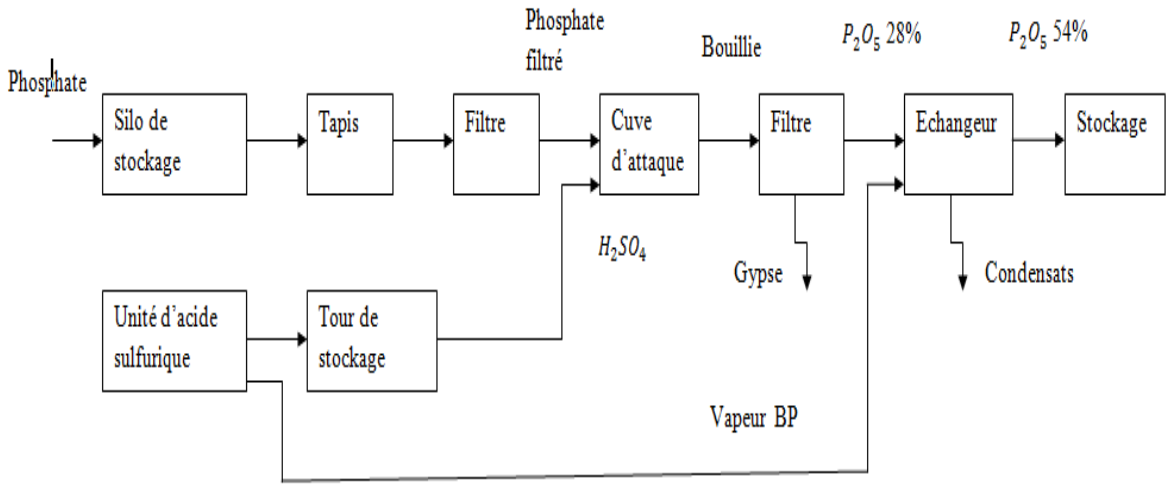


Figure 2.9. *Unité de fabrication de l'acide phosphorique*

Attaque

Cette étape débute par l'attaque des roches de phosphates par l'acide sulfurique dans une cuve d'attaque en présence d'eau industrielle.
Ainsi, après la formation des cristaux, on passe à la phase de maturation où les cristaux subissent un grossissement. C'est une réaction exothermique qui nous donne enfin l'acide phosphorique à 26-28 %.

Filtration

La filtration aura lieu dans un filtre rotatif à 4 compartiments en allant d'une filtration à l'aide d'un acide fort dans le 1er compartiment à un acide moyen dans le 2e et un acide faible dans le dernier. Ainsi, finalement on atteint la phase d'évacuation à l'aide d'un système vis d'Archimède.

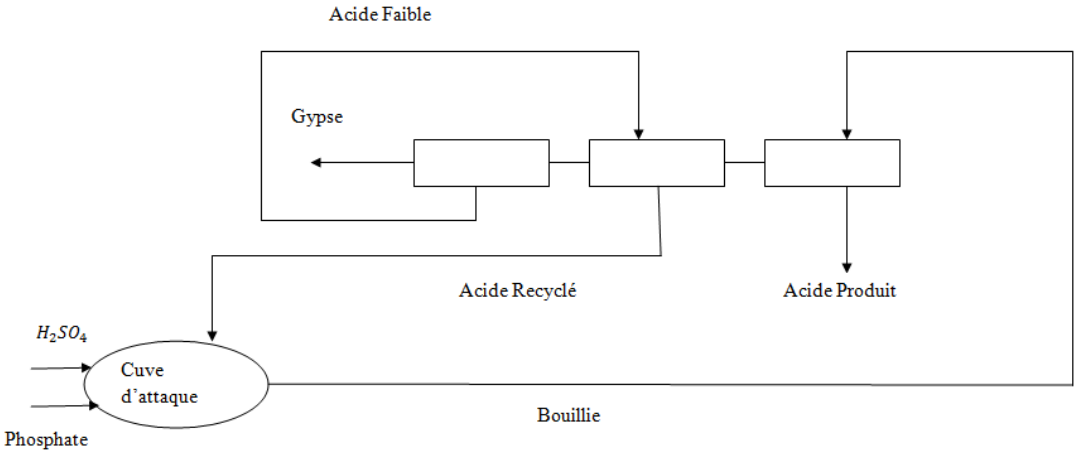


Figure 2.10. *Processus de filtration de l'acide phosphorique*

Concentration

L'acide phosphorique filtré passe dans un échangeur à contre-courant tel que l'acide passe côté calandre et le vapeur côté tube.
On a évaporation de H_2O dans P_2O_5 : augmentation de la concentration pour aller à 54 % : C'est une évaporation sous vide qui est maintenue à l'aide de l'eau de mer.

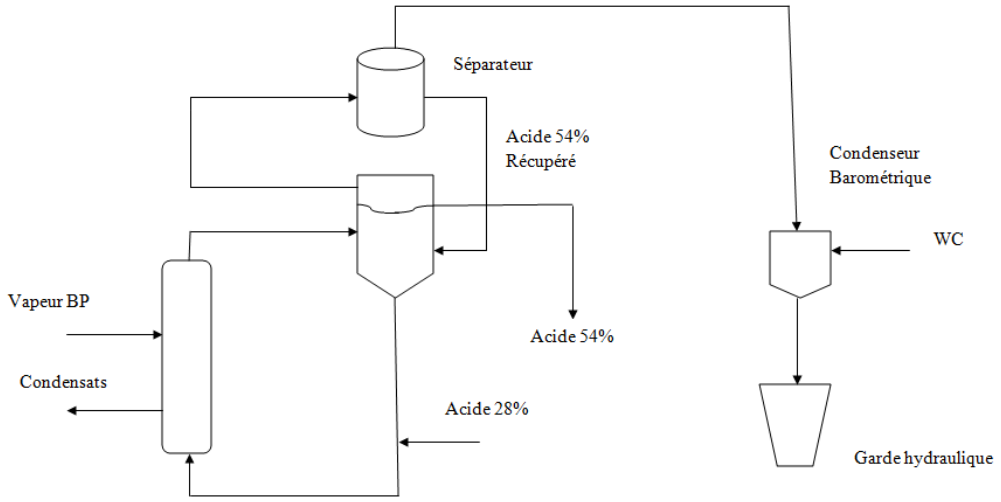


Figure 2.11. *Étapes de la phase de concentration*

4.2. Inventaire de flux entrées/sorties

En examinant la chaîne de production de l'acide phosphorique, on a remarqué certaines insuffisances au niveau de quelques données : extraction de la matière première, l'utilisation du produit…. D'où on se propose de présenter une étude avec un périmètre ***'Gradle to Gate'*** permettant la modélisation allant de la matière première vers la préparation du produit final.

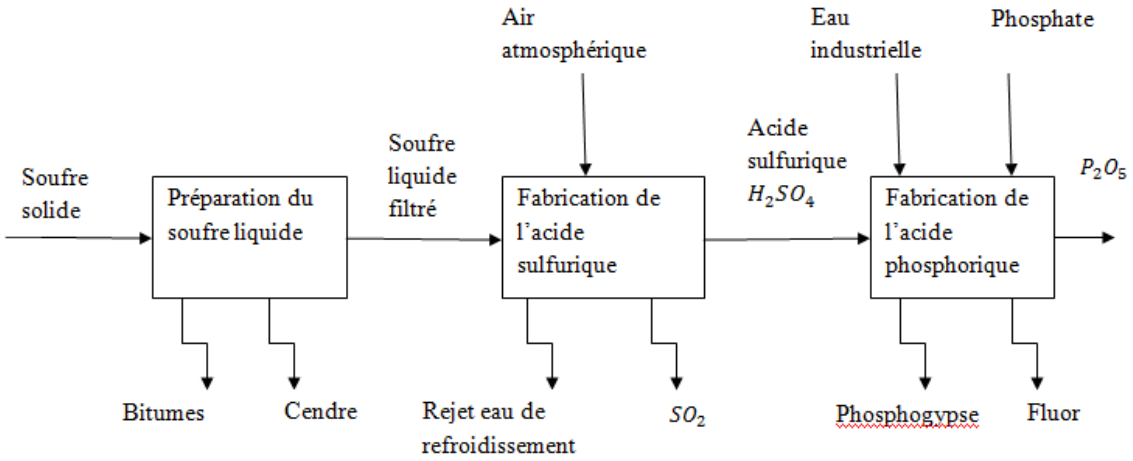


Figure 2.12. *Les étapes de la chaîne de fabrication d'acide phosphorique*

L'usine de production de l'acide phosphorique produit 600 T/j dans le régime de production nominal. Ce scénario de production nécessite les données d'activités suivantes :

Unité de préparation du soufre :

Entrés	**Quantité**
Vapeur HP	10T
Vapeur BP	6T

Adjuvant	350Kg
Électricité	0.2Mw
Transports	2950000 t.km
Production	1000T

Émissions : 1T de cendre et bitume

Unité de production de l'acide sulfurique :

Entrés	**Quantité**
Eau alimentaire	59.04 T
Eau industrielle	576 T
Eau de mer	163200 T
Soufre liquide	1001.7 T
Électricité	1 MW
Vapeur	3690 T
Acide sulfurique produit	3000T

Émissions : 2Kg/T de dioxyde de soufre

Unité de production de l'acide phosphorique :

Entrés	**Quantité**
Eau alimentaire	43200 m^3
Eau industrielle	4800 m^3
Acide sulfurique	1740 T
Phosphate	2700 T
Air	36.10^5 Nm^3
Vapeur	1500 T
Électricité	0.9 MW
Transport phosphate	675000 t.km
Acide Phosphorique produit	600 T

Émissions :

- 350 kg/T de fluor.
- 5.18 T/T de phosphogypse.

4.3. Modélisation avec SimaPro pour l'évaluation des impacts environnementaux

4.3.1. Représentation en arborescence

Le schéma de la figure 2.13 est une arborescence représentant les impacts liés à la production de l'acide phosphorique.

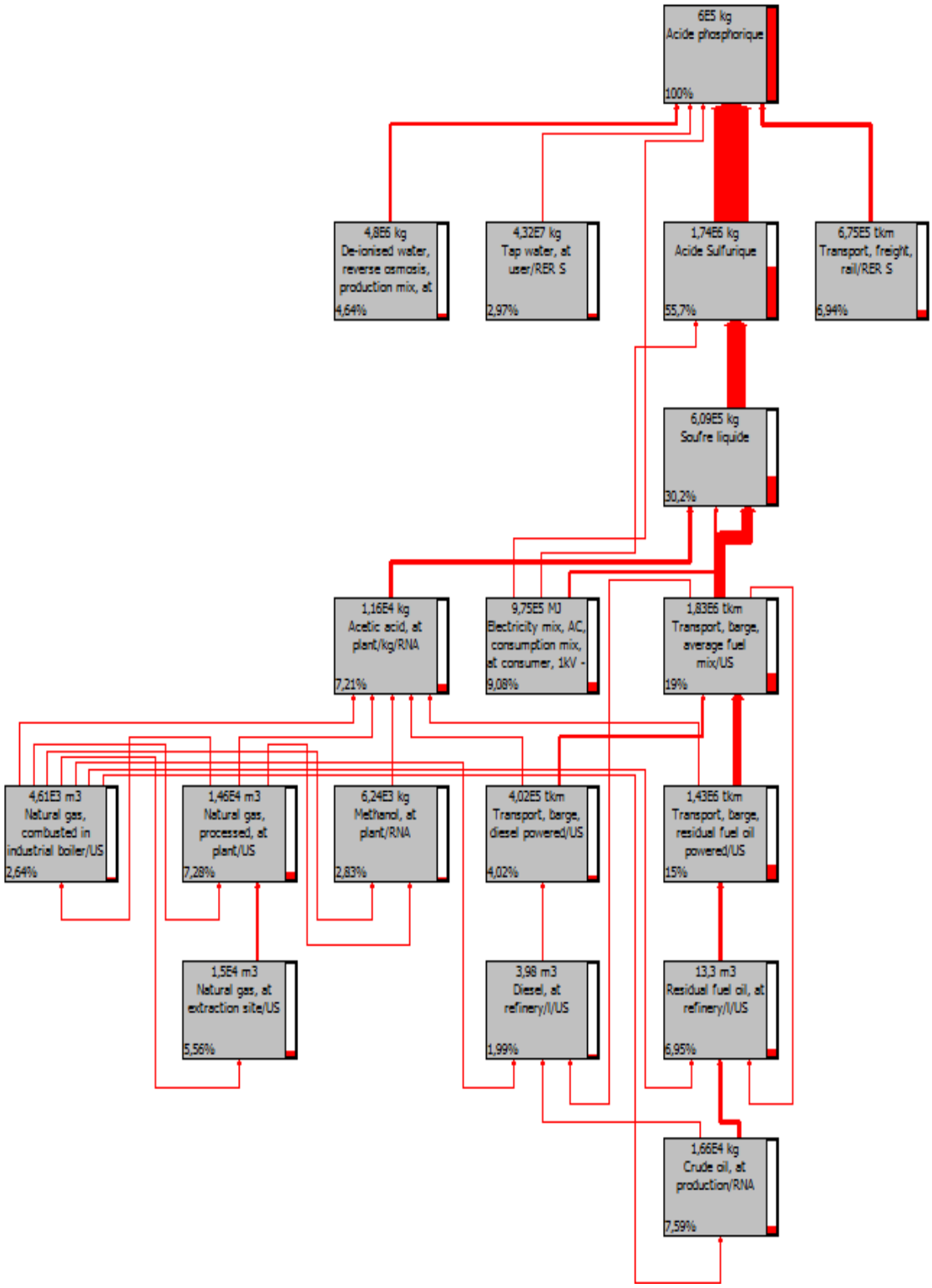


Figure 2.13. *Modélisation en arborescence de la chaîne de production de l'acide phosphorique*

Il apparaît à partir de l'arborescence que les impacts liés à la production de l'acide phosphorique sont principalement générés par le processus de fabrication de l'acide sulfurique (55.7 %) et par le transport du phosphate (6.94 %).

4.4. Résultats de la modélisation à l'aide de la méthode CML

L'objectif d'une intégration de l'éco-fabrication est l'éco-conception d'un processus de production ou de fabrication. Cet objectif nécessite une banque de données et d'informations pour réussir à maîtriser la chaîne de production étudiée.
C'est dans ce sens qu'on se propose de présenter une étude environnementale basée sur la méthode CML permettant l'évaluation des impacts environnementaux de la chaîne de production selon plusieurs indicateurs.

4.4.1. Caractérisation des impacts de la chaîne

On présente dans le tableau 2.4 la quantification des impacts environnementaux pour l'unité fonctionnelle choisie**.**

Tableau 2.4. *Quantification des émissions à l'aide de la méthode CML*

Catégorie d'impact	Unité	Total
Abiotic depletion	kg Sb eq	1520,66
Acidification	kg SO2 eq	5544,981
Eutrophication	kg PO4--- eq	235,5341
Global warming (GWP100)	kg CO2 eq	241060,2
Ozone layer déplétion (ODP)	kg CFC-11 eq	0,006584
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	84029,95
Fresh water aquatic ecotox.	kg 1,4-DB eq	38593,49
Marine aquatique écotoxicité	kg 1,4-DB eq	1,1E+08
Terrestrial écotoxicité	kg 1,4-DB eq	253,7961
Photochemical oxidation	kg C2H4	223,7176

Pour la mise en place des stratégies d'amélioration du comportement écologique de la chaîne, on présente dans la figure 2.14 la répartition des émissions suivant les éléments de la chaîne.

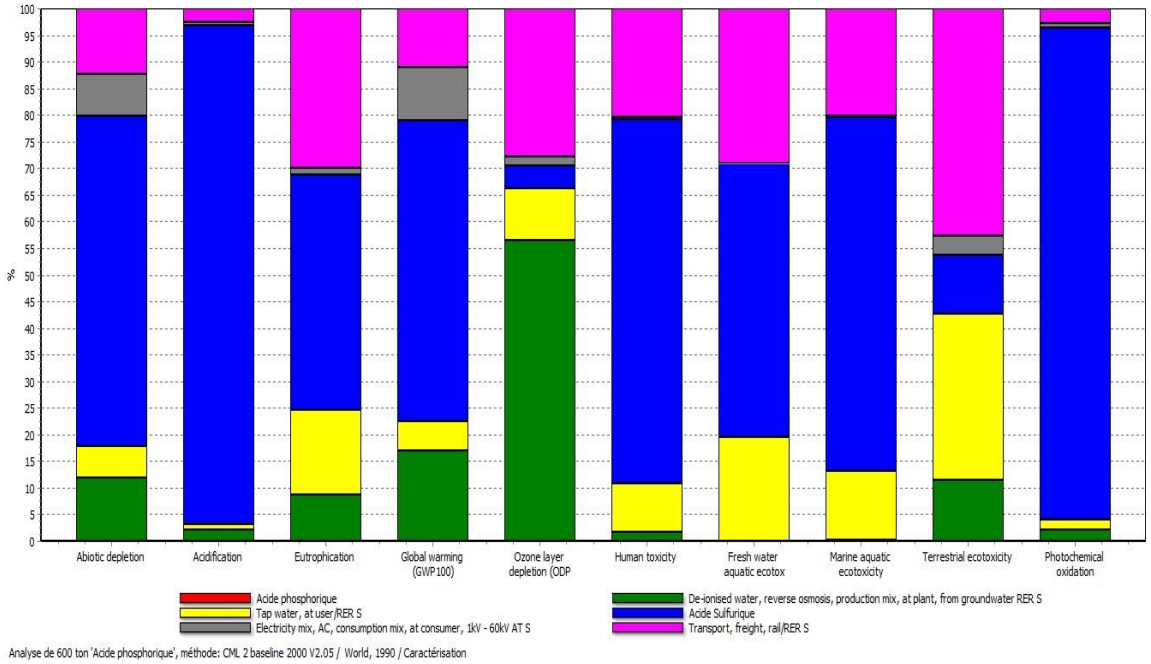


Figure 2.14. *Répartition de l'émission environnementale*

4.4.2. Comparaison des émissions : (Normalisation)

Elle consiste à rapporter les résultats d'évaluation d'impacts à des impacts d'autres produits de consommation courants ou des indicateurs d'émission de substances (figure 2.15).

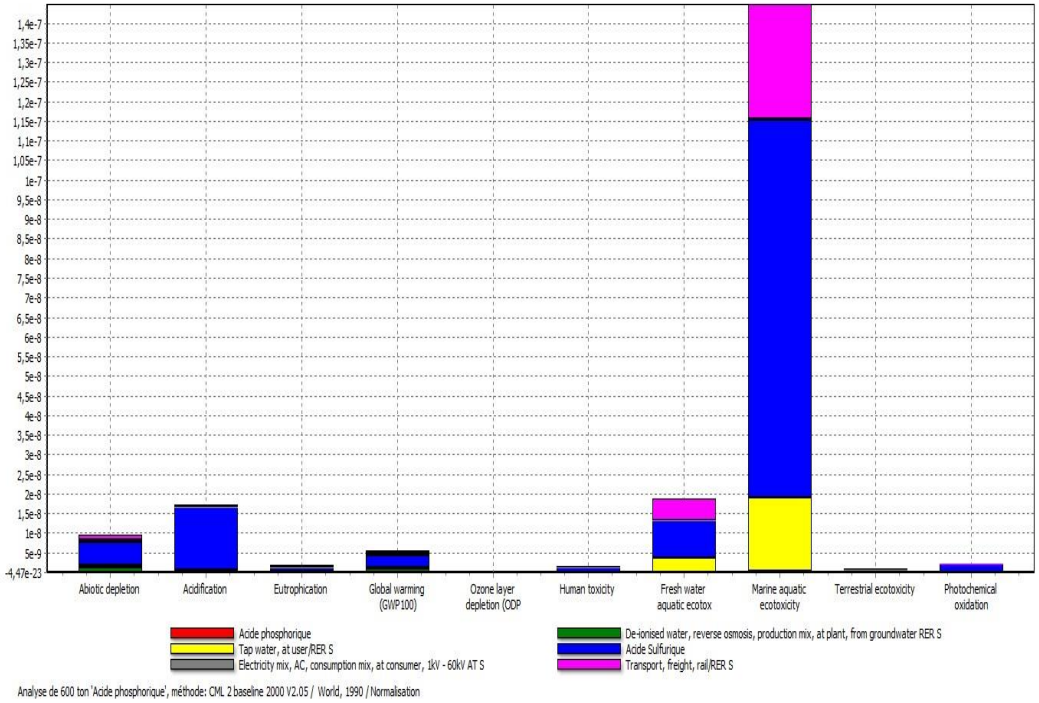


Figure 2.15. *Normalisation des impacts environnementaux*

La méthode CML indique que les impacts les plus importants de la chaîne sont :

- Marine aquatic ecotoxicity : MAETP : le potentiel d'écotoxicité aquatique marine
- Fresh water aquatic ecotex : FAETP : le potentiel d'écotoxicité aquatique de l'eau
- Acidification : AP : le potentiel d'acidification
- Abiotic depletion : ADP : le potentiel d'épuisement des ressources
- Global warming : GWP : le potentiel de réchauffement climatique

On s'intéresse dans la suite de l'étude à la recherche de l'origine de ces émissions au niveau de la chaîne.

4.4.3. Le potentiel d'écotoxicité aquatique marine MAETP

Le potentiel d'écotoxicité aquatique est de l'ordre de 1.1 10^8 kg 1,4-DB éq. Ce taux est très important représentant un vrai danger sur la nature. On présente dans la figure 2.16 les sources de ce potentiel pour l'usine d'acide phosphorique.

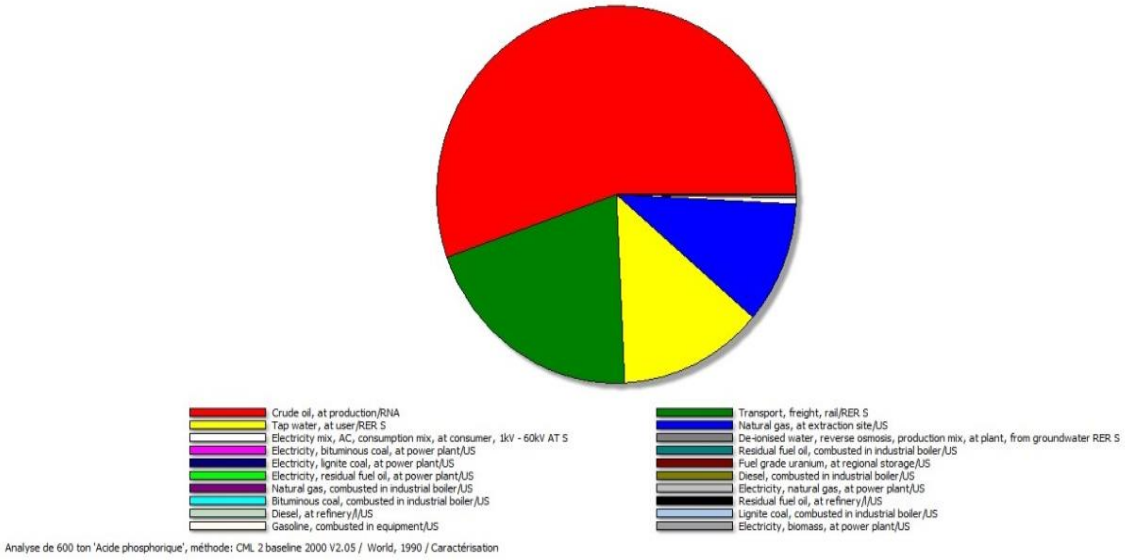


Figure 2.16. *Potentiel d'écotoxicité aquatique marine*

Les résultats présentés montrent que ce potentiel est dû aux 4 éléments suivants : le transport de la matière première, l'utilisation de l'eau (eau industrielle et eau de mer), l'air et le fuel.

4.4.4. Le potentiel d'écotoxicité aquatique de l'eau FAETP

La fabrication de l'acide phosphorique est responsable d'une écotoxicité aquatique de l'eau de l'ordre de 38593.49 kg 1,4-DB éq. Ce potentiel résume l'influence de la production sur la qualité des ressources d'eau utilisées.

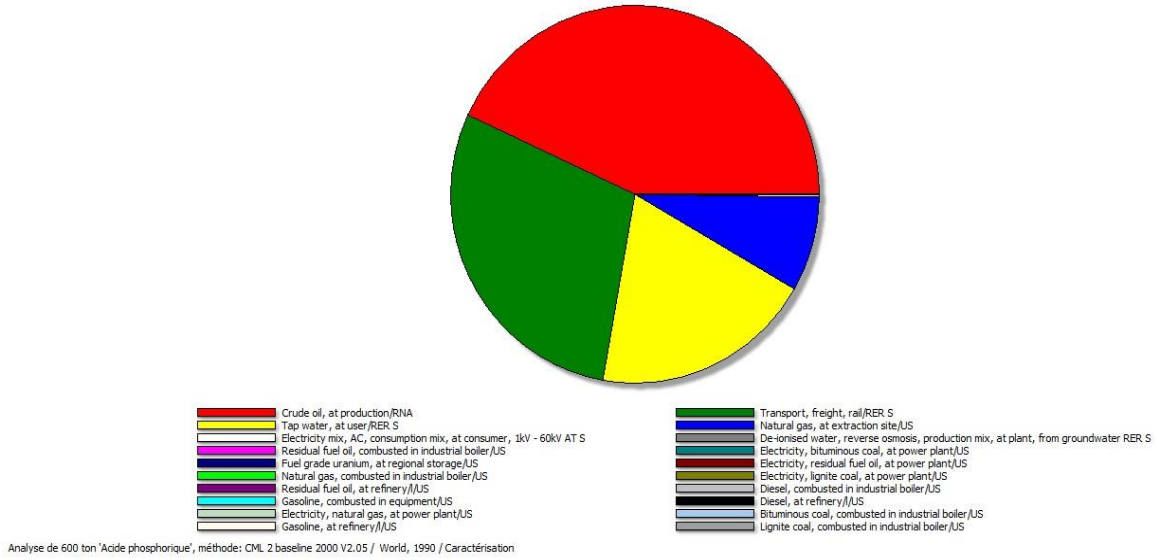


Figure 2.17. *Potentiel d'écotoxicité aquatique de l'eau*

À ce niveau, on constate que l'eau de refroidissement utilisé et le transport sont à l'origine des émissions néfastes pour la qualité d'eau (figure 2.17).

4.4.5. Acidification

Avec un taux de l'ordre de 5544.981 kg SO_2 éq, le potentiel d'acidification se trouve influencé par l'unité d'acide sulfurique. Cette dernière est responsable du dégagement du dioxyde de soufre ainsi que l'eau de refroidissement utilisée au cours de ce processus.

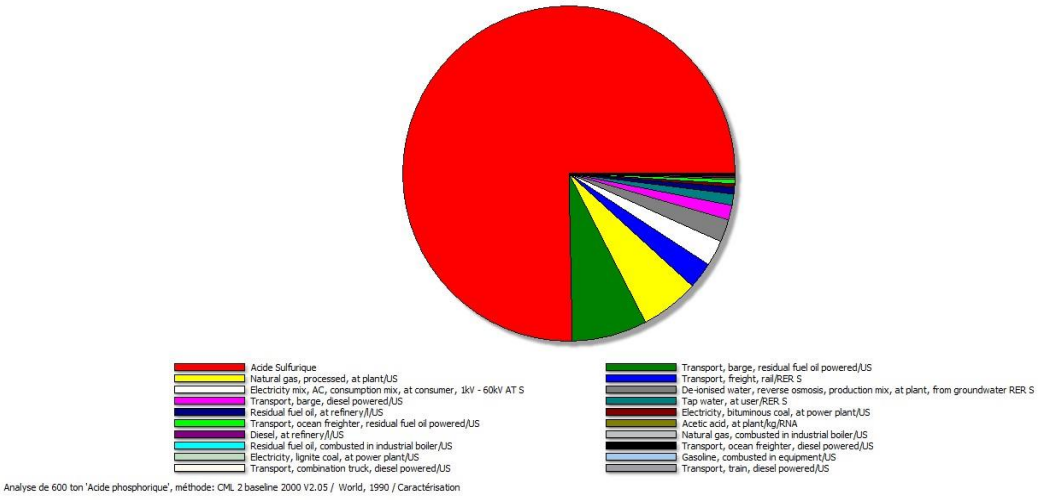


Figure 2.18. *Potentiel d'acidification*

L'acidification est due essentiellement à l'acide sulfurique (75 % des émissions) puisque ce processus est responsable de dégagement du dioxyde de soufre. Le reste des émissions est dû aux autres éléments liés au soufre tel que le transport de cette matière première (figure 2.18).

4.4.6. Le potentiel d'épuisement des ressources ADP

Le potentiel d'épuisement des ressources représente un indicateur important pour l'évaluation des émissions de cette chaîne de production. Dans ce cas, il est de l'ordre de 1520.66 kg Sb éq. L'utilisation de certaines sources d'énergie est la cause de l'augmentation de ce taux.

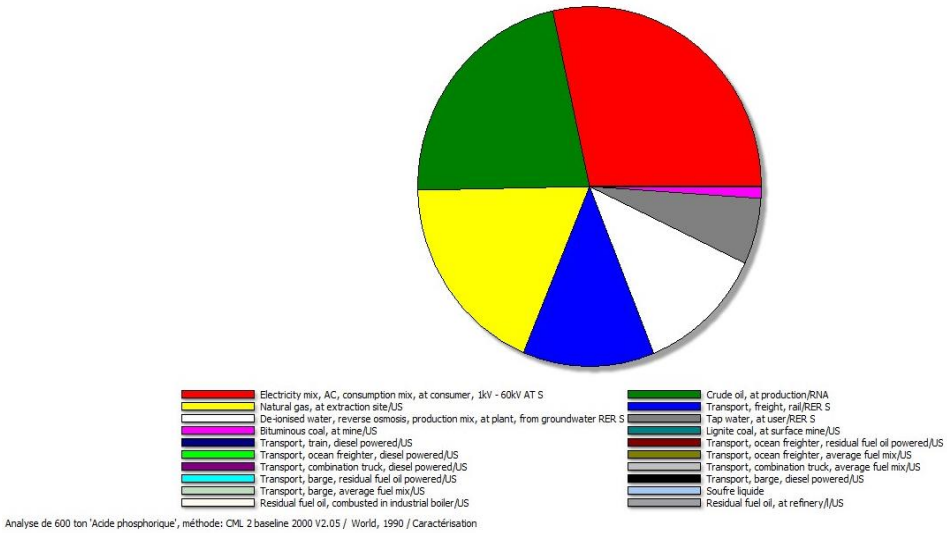


Figure 2.19. *Potentiel d'épuisement des ressources*

À l'aide de la figure 2.19, on constate que l'électricité et le transport sont les éléments responsables pour l'augmentation de l'épuisement des ressources.

4.4.7. Le potentiel de réchauffement climatique GWP

Le potentiel de réchauffement climatique représente l'indicateur du dégagement des gaz à effet de serre. En ramenant le potentiel à l'équivalentCO_2, la chaîne étudiée est responsable d'un impact de l'ordre de 241060.2 kg éq CO_2.

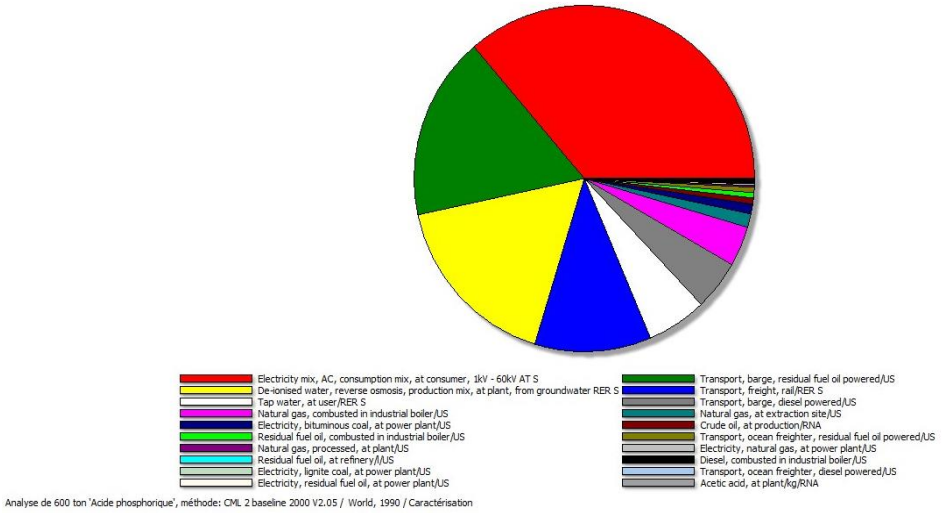


Figure 2.20. *Potentiel de réchauffement climatique*

Cet indicateur se trouve influé par l'utilisation de l'eau industrielle au niveau de l'unité d'acide phosphorique ainsi que l'électricité et le transport (figure 2.20).

4.5. Aide à la décision

4.5.1. Mise en situation

Face à certaines contraintes, l'usine d'acide phosphorique est amenée au travail selon deux scénarios possibles de production : le scénario nominal et le scénario minimal.

On se propose de présenter une étude d'aide à la décision entre ces deux scénarios permettant de mettre en jeu un sur-classement basé sur une étude écologique et économique.

4.5.2. Application pour la société de production de l'acide phosphorique

Scénarios Etudiés

L'étude de la chaîne de production de l'acide phosphorique nous a montré que la société possède une flexibilité au niveau de l'utilisation de la matière première (Soufre et phosphate). À ce niveau, on distingue deux scénarios qui s'ajoutent au scénario nominal de fonctionnement :

- Scénario avec utilisation du phosphate humide : ce scénario dépend de la qualité du phosphate utilisé qui nécessite 75 % d'acide sulfurique au lieu de 64 %.
- Scénario en utilisant le soufre provenant du Brésil : ce scénario est basé sur le changement de fournisseur.

Étude de cas avec pondération à importance égale

L'attribution des poids aux critères n'est pas une tâche facile et elle est sujette à un débat concernant le point de vue du décideur. En effet, le choix des poids revient au décideur qui dans ce cas un fabricant ou un responsable de production ou aussi un responsable du projet ou de l'usine.

Dans un premier lieu, nous avons considéré une pondération pour le classement partiel des scénarios, évalués par l'ACV, par l'application de la méthode PROMETHEE I basée sur une importance égale pour l'ensemble des critères.

Modélisation

L'implémentation de la méthode Promethee pour l'aide à la décision nécessite l'initialisation de certains paramètres : la fonction de préférence, le type d'optimisation (max/min), les poids des éléments de décision.

Tableau 2.5. *Modélisation de l'aide à la décision pour l'usine de fabrication de l'acide phosphorique*

Scenario1	ADP	AP	EP	FAETP	GWP	HTP	MAETP	ODP	POCP	TETP
Unit	Kg Sb eq	Kg SO2 eq	Kg PO4 eq	Kg 1,4 DB eq	Kg CO2 eq	Kg 1,4 DB eq	Kg 1,4 DB eq	Kg CFC 11 eq	Kg C2H4	Kg 1,4 DB eq
Cluster/Group	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆
Preferences										
Min/Max	min	min	min	min	min	min	min	min	min	min
Weight	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Preference Fn.	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual
Thresholds	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute
- Q: Indifference	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
- P: Preference	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
- S: Gaussian	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Statistics										
Minimum	1520,66	5544,98	235,53	38593,50	241060,20	84029,95	110000000,00	0,01	223,70	254,00
Maximum	2171,60	6612,00	400,80	68831,00	350658,00	169984,00	220000000,00	0,01	259,30	258,60
Average	1791,79	6198,43	296,59	49811,20	285405,53	115978,65	150666666,67	0,01	247,00	256,77
Standard Dev.	276,63	467,47	74,05	13521,12	47122,19	38400,49	49270229,91	0,00	16,48	1,99
Evaluations										
Scénario nominal	1520,66	5544,98	235,53	38593,50	241060,20	84029,95	110000000,00	0,01	223,70	254,00
Scénario Phosph...	1683,10	6438,31	253,44	42009,10	264498,40	93922,00	122000000,00	0,01	259,30	258,60
Scénario fourniss...	2171,60	6612,00	400,80	68831,00	350658,00	169984,00	220000000,00	0,01	258,00	257,70

Suite à la modélisation présentée dans le tableau 2.6, on obtient le résumé du modèle global en termes de poids et influence sur les différents scénarios (figure 2.21).

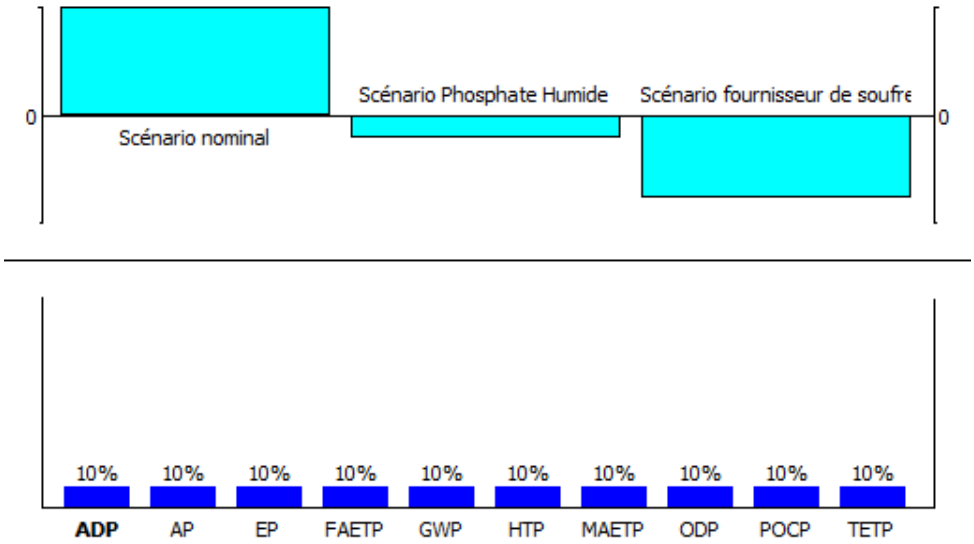


Figure 2.21. *Répartition des poids des critères pour les différents scénarios*

Résultats de sur_classement :

Le résultat obtenu est le classement final des scénarios en tenant compte des paramètres définis au début de la modélisation.

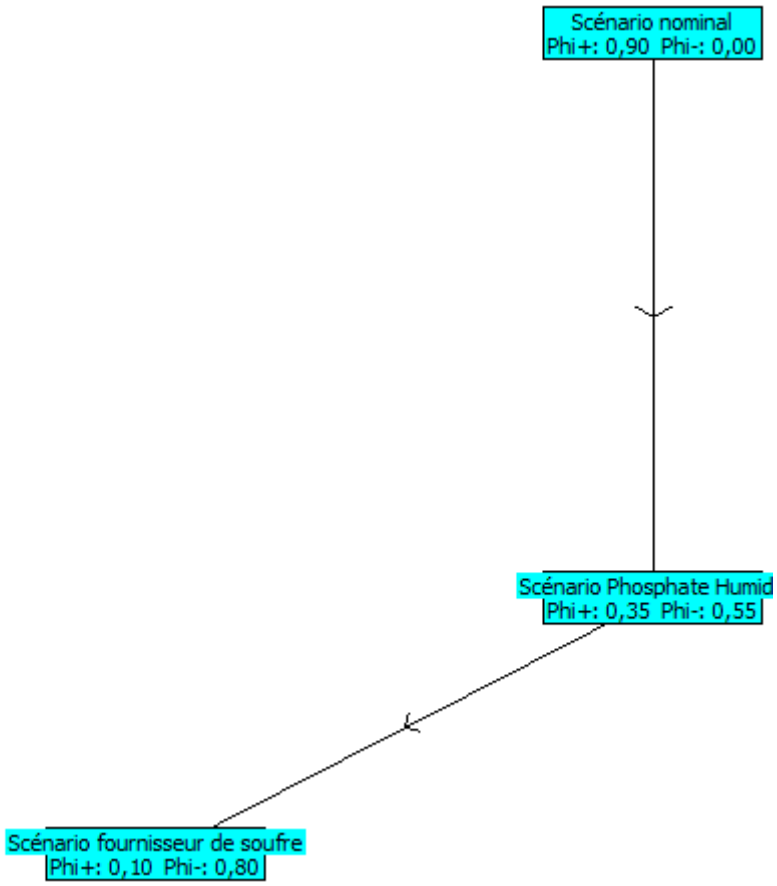


Figure 2.22. *Résultats de surclassement des scénarios*

Pour la production d'acide phosphorique, le scénario nominal représente la solution écologique pour la société dans le cas actuel (figure 2.22).

Mais pour améliorer ce scénario optimal, on passe à l'application du modèle GAIA (Mareschal and Brans, 1988) qui représente en plan une représentation géométrique des alternatives et des critères.

GAIA (Geometrical Analysis for Interactive Assistance) est une méthode de visualisation géométrique servant de complément aux méthodes PROMÉTHÉE. Elle permet de repérer les critères conflictuels, de chercher les bons compromis et de faciliter la compréhension du problème de décision auquel le décideur se trouve confronté. Sur ce plan on retrouve les actions potentielles, les critères et les poids liés représentés respectivement par des points, des axes et un vecteur particulier. La base de cette méthode est la construction de la matrice des flux unicritères.

Figure 2.23. *Représentation géométrique des alternatives et des critères*

Chaque action a_i sera donc représentée par un point :

$\alpha_i : (\emptyset_1(a_i), \emptyset_2(a_i), \ldots, \emptyset_j(a_i), \ldots, \emptyset_k(a_i))$

D'un espace euclidien à k dimensions dont les axes représentent les *k* critères. Le but de la méthode GAIA est de projeter orthogonalement ces points sur un plan passant par l'origine et ce en essayant de perdre le moins d'information possible. Les points ainsi obtenus sont notésA_i.

Lorsque tous ces éléments sont représentés sur le plan GAIA, il est simple pour le décideur d'analyser la situation :

- Une action *i* dont la représentation A_i sur le plan GAIA possède la meilleure projection orthogonale sur cj est l'action optimale pour ce critère.
- Une action *i* dont la représentation A_i sur le plan GAIA possède la meilleure projection orthogonale sur II est celle permettant d'avoir le meilleur compromis.
- Si deux axes représentants des critères ont un produit scalaire négatif, ceux-ci sont antagonistes

4.5.3. Aide à la décision écologique avec agrégation spécifique

Le problème de pondération est très important dans cette étape, d'où la présentation d'une pondération plus réaliste et plus pragmatique est considérée en attribuant plus d'importance aux impacts majeurs engendrés par les scénarios.

En effet un poids W_j est attribué au $j^{ème}$ critère. Ce poids est d'autant plus grand que le critère (aspect environnemental) est « important ».

À ce niveau de modélisation, l'importance des impacts environnementaux est relative à la pollution journalière respective d'une personne dans le monde qu'on appelleraI_j.

Ainsi, plus l'impact est grand plus son poids est élevé. Le poids est alors une fonction définie comme suit :

$$W_j = \frac{\max(I_f, f = 1,2 \dots n)}{I_j}$$

Tableau 2.6. *Méthodologie de calcul des poids des critères*

	AP	EP	FAETP	GWP	HTP	MAETP	ODP	POCP	TETP	ADP
Impact journalier par personne	0.098	0.065	1.425	17.166	14.908	79.672	7.9 10¨-5	0.016	0448	0.001
Impact maximal des scénarios	6612	253	68831	350658	169984	220000000	0.01	259	258	2171
Poids	101723	6154	48302	20427	11402	2761321	127	16206	577	2710600

Modélisation : Dans ce cas d'étude, on change la pondération des critères au niveau du modèle global présenté au départ (tableau 2.7).

Tableau 2.7. *Modélisation de l'aide à la décision*

Scenario1	ADP	AP	EP	FAETP	GWP	HTP	MAETP	ODP	POCP	TETP
Unit	Kg Sb eq	Kg SO2 eq	Kg PO4 eq	Kg 1,4 DB eq	Kg CO2 eq	Kg 1,4 DB eq	Kg 1,4 DB eq	Kg CFC 11 eq	Kg C2H4	Kg 1,4 DB eq
Cluster/Group	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆
Preferences										
Min/Max	min	min	min	min	min	min	min	min	min	min
Weight	2710600,00	101723,00	6154,00	48302,00	20427,00	11402,00	2761321,00	127,00	16206,00	577,00
Preference Fn.	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual
Thresholds	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute
- Q: Indifference	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
- P: Preference	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
- S: Gaussian	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Statistics										
Minimum	1520,66	5544,98	235,53	38593,50	241060,20	84029,95	110000000,00	0,01	223,70	254,00
Maximum	2171,60	6612,00	400,80	68831,00	350658,00	169984,00	220000000,00	0,01	259,30	258,60
Average	1791,79	6198,43	296,59	49811,20	285405,53	115978,65	150666666,67	0,01	247,00	256,77
Standard Dev.	276,63	467,47	74,05	13521,12	47122,19	38400,49	49270229,91	0,00	16,48	1,99
Evaluations										
Scénario nominal	1520,66	5544,98	235,53	38593,50	241060,20	84029,95	110000000,00	0,01	223,70	254,00
Scénario Phosph...	1683,10	6438,31	253,44	42009,10	264498,40	93922,00	122000000,00	0,01	259,30	258,60
Scénario fourniss...	2171,60	6612,00	400,80	68831,00	350658,00	169984,00	220000000,00	0,01	258,00	257,70

Le changement de la méthode de pondération influe sur la disposition des résultats pour l'étude comparative entre les différents scénarios (figure 2.24).

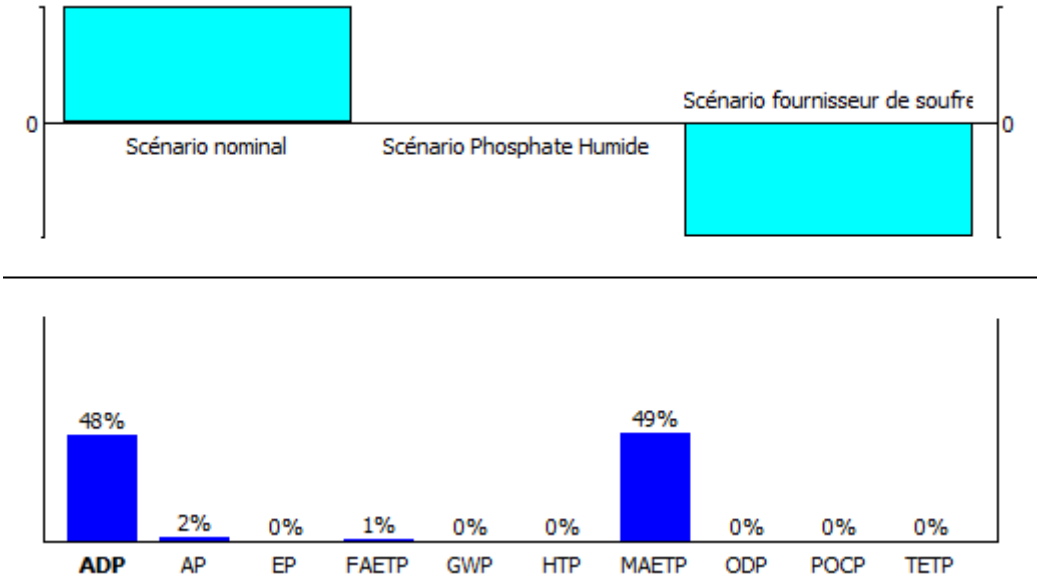


Figure 2.24. *Répartition des poids des critères pour les différents scénarios*

On remarque que ADP et MAETP représente les deux critères dominant au niveau des poids. Ces deux impacts vont être les deux éléments les plus influant au niveau de la démarche d'aide à la décision.

none	★★★★★	100,00	100%
none	★★★★★	*100,00*	*100%*
ADP	★★☆☆☆	47,75	48%
AP	☆☆☆☆☆	1,79	2%
EP	☆☆☆☆☆	0,11	0%
FAETP	☆☆☆☆☆	0,85	1%
GWP	☆☆☆☆☆	0,36	0%
HTP	☆☆☆☆☆	0,20	0%
MAETP	★★☆☆☆	48,64	49%
ODP	☆☆☆☆☆	0,00	0%
POCP	☆☆☆☆☆	0,29	0%
TETP	☆☆☆☆☆	0,01	0%

Figure 2.25. *Influence du changement des poids*

Résultats de sur_classement

En appliquant la démarche d'agrégation déjà définie précédemment, le scénario nominal reste le plus favorable. Cependant, on remarque une amélioration au niveau des flux comparatifs entre les scénarios (figure 2.26).

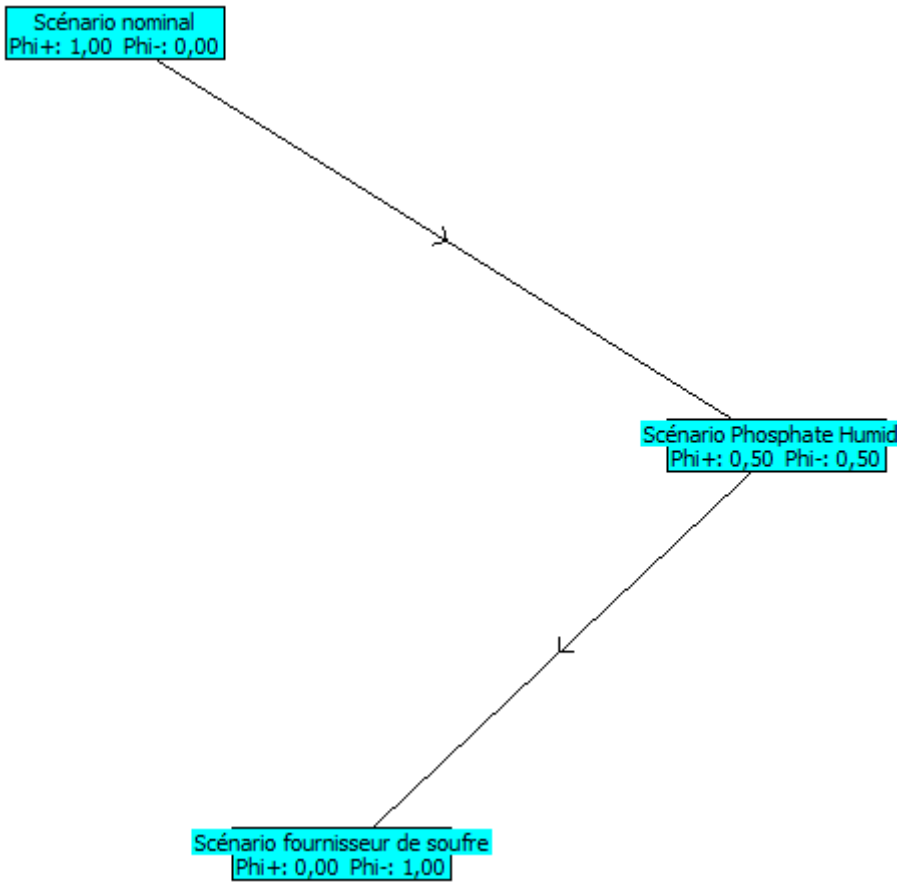


Figure 2.26. *Classement partiel des scénarios de production*

Dans ce cas, le potentiel d'écotoxicité aquatique ainsi que l'épuisement des ressources représentent les deux axes d'améliorations possibles pour la chaîne de fabrication de l'acide phosphorique. Ces pistes d'amélioration peuvent être à l'origine du changement du comportement écologique du processus étudié.

Conclusion

L'approche process pour la modélisation d'éco-fabrication traite la mise en place d'un scénario de fabrication minimisant les impacts environnementaux. Cet objectif nécessite la définition d'une stratégie d'aide à la décision multi critères permettant l'étude comparative de certains scénarios possibles sur une base écologique.

Cette approche multi critères est basée sur les deux méthodes de surclassement : Evamix et Promethee.

D'une part, la méthode Evamix traite la phase de choix des impacts environnementaux à quantifier à l'aide d'une démarche tenant en compte les actions ordinales et cardinales.

D'autre part, la méthode Promethee est appliquée à la fin de l'approche pour aider au choix final du scénario de fabrication. Cette méthode a montré une efficacité de résolution des

problèmes multi critères grâce à une étude comparative entre les différentes alternatives en tenant compte de chaque critère d'étude.

Pour la fabrication d'acide phosphorique, le scénario actuel est le scénario optimal permettant la production avec le minimum possible d'impacts écologiques.

L'évaluation écologique des émissions de la chaîne de production d'acide phosphorique montre que pour cette usine l'unité d'acide sulfurique est responsable d'un pourcentage important d'émission néfaste (55,7 %).

Cette illustration nous amène à penser aux stratégies d'amélioration pour cette unité dans le but de l'étude des différents paramètres techniques permettant la minimisation des impacts écologiques en tenant compte de la contrainte économique.

À ce niveau, on peut passer à une approche traitant la conception du procédé en tenant compte du produit. L'optimisation multi objectifs constitue l'élément clé pour cette étape d'étude pour la modélisation d'éco-fabrication.

Chapitre 3 : Approche Produit pour la modélisation de l'Eco-fabrication

Introduction

L'éco-conception représente une étape primordiale pour le développement durable et du respect de l'environnement. À l'issue de cette phase, le bureau d'étude présente les plans finals du produit éco-conçu en tenant compte des différentes contraintes technologiques.

On présente dans cette partie 'l'approche produit' pour la modélisation de l'éco-fabrication permettant la préparation des procédés de fabrication ainsi que leurs paramètres optimaux. Cette démarche a pour objectif l'intégration de l'aspect écologique dans la phase de fabrication en tenant compte de la contrainte économique. À ce niveau l'étude environnementale est l'un des objectifs à atteindre dès la phase d'étude de la fabrication.

Ainsi, l'optimisation des paramètres dans ce modèle est basée sur l'optimisation multi objectifs où les fonctions écologiques et économiques sont couplées en respectant les différentes contraintes technologiques. L'optimisation est une branche des mathématiques qui permet de résoudre des problèmes en déterminant le meilleur élément d'un ensemble selon certains critères prédéfinis. On distingue les problèmes d'optimisation mono objective et celle multi objectifs.
Certains outils ont été développés pour la résolution de ce type de problème tels que : les algorithmes génétiques, optimisation par essaim particulaire…
L'objectif majeur de l'optimisation pour la phase de fabrication a été la minimisation du coût de production. Cet objectif est couplé dans la plupart des cas à des contraintes qui sont de nature technologique pour assurer la faisabilité technique du procédé étudié.
Pour la mise en évidence de l'éco-fabrication, les émissions écologiques ont été introduites dans la phase d'optimisation. Généralement, le respect de l'environnement constitue l'une des contraintes à respecter.
Ce chapitre traite la présentation de 'l'approche produite' pour la modélisation de l'éco-fabrication basée sur l'optimisation multi objectifs ainsi que la maîtrise de la consommation des ressources durant la phase de fabrication.

1. Approche produit pour la modélisation de l'Eco-fabrication

Au niveau de l'installation d'une nouvelle chaîne de production, le problème de l'Eco-fabrication se présente clairement. À l'issue du bureau d'étude (BE), on possède des plans de produits ainsi que les flux de matières proposées. À ce niveau, on intervient pour déterminer les différents processus à utiliser pour l'obtention du produit final en respectant l'écologie.
Notre méthodologie est la suivante (figure 3.1) :

1) À l'aide du plan délivré par le BE, on définit les étapes de réalisation du produit.
2) Pour chaque opération, on détermine : le bilan énergétique, le bilan matière ainsi que le bilan des émissions.
3) Après la détermination des bilans décrits ci-dessus, on passe à l'étape de choix des indicateurs écologiques à étudier.
4) Évaluation des émissions de la chaîne suivant les indicateurs présentés.

5) Interprétation des résultats et optimisation multi objectifs.
6) Aide à la décision pour déterminer le scénario final de production ou de fabrication.

La figure 3.1 présente l'approche produit pour la modélisation de l'éco-fabrication.

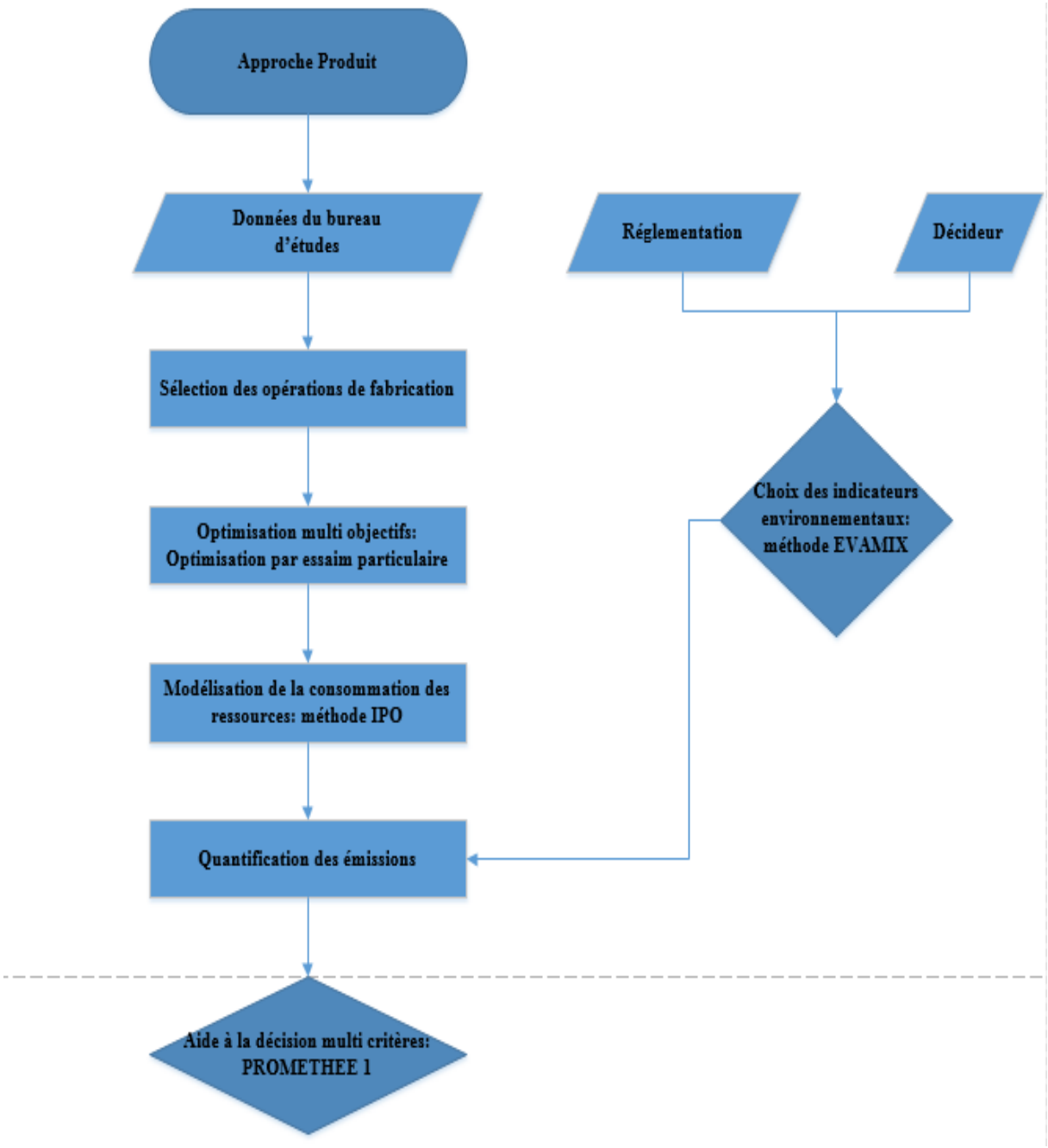


Figure 3.1. *Approche Produit pour la modélisation d'éco-fabrication*

Cette méthodologie diffère par rapport à l'approche process au niveau de la modélisation des flux ainsi que l'optimisation des procédés. On se propose de détailler ces phases dans ce qui suit.

L'éco-fabrication repose principalement sur les piliers suivants : économie, écologie et technologie. On peut donc la définir comme étant un processus qui assure « la faisabilité technique de la transformation de la matière première en assurant le respect de l'environnement et la consommation des ressources sans augmenter le coût ».

C'est à partir de la maîtrise des ressources, de la technologie utilisée et des dépenses qu'on peut fixer, notre modèle pour assurer une démarche d'éco-fabrication.

L'objectif de cette approche de modélisation de l'éco-fabrication est la détermination d'un process de fabrication du produit étudié qui minimise les émissions environnementales et diminue la consommation des ressources.

Comme le montre la figure 3.2, notre modèle repose sur 3 niveaux globaux d'étude qui sont : l'optimisation multiobjective, la maîtrise des ressources et l'aide à la décision.

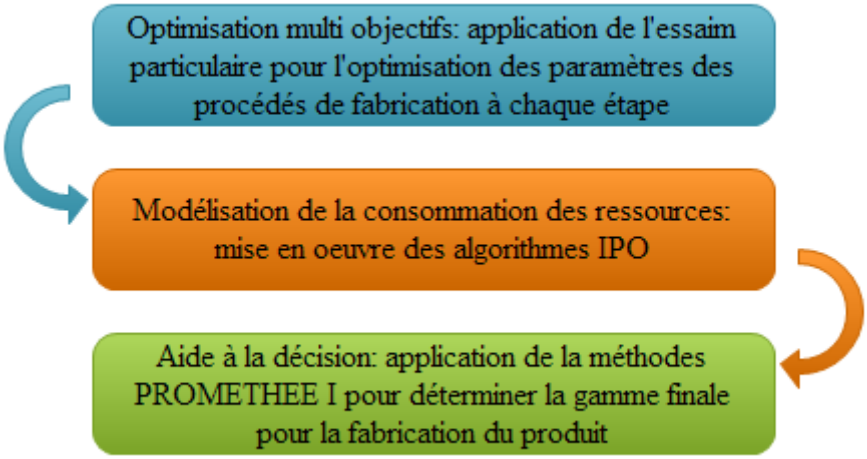


Figure 3.2. *Les niveaux de modélisation pour l'approche produit*

Lors de la préparation d'un projet de fabrication, on tient compte de la faisabilité technique liée aux contraintes économiques. On traite dans cette approche l'intégration d'une faisabilité écologique comme un objectif à atteindre.

Suite à la préparation des plans finals du produit, on passe dans une première étape à préparer les étapes de fabrication ou le mode opératoire de la fabrication. À ce niveau, plusieurs scénarios peuvent se présenter pour l'obtention de notre produit final en respectant les contraintes techniques du bureau d'étude.

Le niveau 1 de notre approche traite l'optimisation des paramètres des procédés choisis pour la mise en œuvre des opérations respectant simultanément : l'économie, l'écologie et la faisabilité technique. À ce niveau, ces derniers objectifs doivent être couplés pour modéliser et déterminer les paramètres des procédés.

Pour atteindre ce niveau, certaines méthodes de résolution peuvent se présenter. On peut citer : les algorithmes génétiques, les essaims particulaires…

Dans ce cadre d'étude, nous adoptons les essaims particulaires comme algorithme de résolution. Ainsi, la faisabilité technique est bien assurée en tenant compte des objectifs économiques et écologiques.

Au niveau 2, nous passons à la modélisation de la consommation des ressources. Cette étape consiste à présenter les opérations de la chaîne de production sous une forme matricielle permettant de décrire la relation entre les entrées et les sorties. Cette description a pour objectif :

- La préparation des données d'activités pour chaque opération.
- L'aide à la décision pour l'optimisation ou la minimisation de la consommation des ressources.

Ainsi, l'avantage de cette méthodologie est d'éviter le problème classique de la double quantification des ressources. Ce problème peut se résumer par le risque observé au niveau des études présentées sur l'analyse du cycle de vie où un matériau utilisé dans deux opérations différentes peut être quantifié deux fois. Donc cette méthodologie permet de tenir compte de l'échange interne du flux entre les différentes unités ou opérations.

Dans l'approche IPO, on évite ce risque par une modélisation mathématique tenant compte des relations entre les différentes opérations. Une fois le matériau est implanté dans la chaîne, l'algorithme permet de suivre son évolution jusqu'à la fin. Au niveau de la matrice finale, on trouve les différentes entrées regroupées ainsi que les sorties.

Le long de la chaîne, on peut aussi intervenir au niveau des opérations élémentaires. À chaque opération, on peut classer les sorties ainsi que la détermination de l'efficacité d'utilisation des ressources.

Suite à ce niveau d'approche, on quantifie les impacts environnementaux selon le besoin d'étude pour préparer une base des données écologiques permettant la prise de décisions par la suite pour le choix du scénario final.

Le niveau 3 constitue le dernier niveau pour cette approche. L'objectif est l'utilisation des techniques d'aide à la décision pour le classement des scénarios possibles. Cette étape dépend essentiellement de la pondération des critères de décision. On adopte comme pour la première approche la méthode PROMETHEE I pour développer ce niveau.
Cette approche tend à préparer une étude complète de la fabrication du produit en assurant un meilleur respect de l'écologie et le gain économique.
On se propose dans ce qui suit de détailler les phases pivots de cette approche : dans la section 2, on présente l'étape d'optimisation des paramètres des procédés de fabrication. Cette section traite la mise en œuvre de l'essaim particulaire pour le couplage entre les objectifs économiques et écologiques dans l'étude des opérations de fabrication du produit étudié.
Au niveau de la section 3, on présente la modélisation de la consommation des ressources pour chaque opération de fabrication ce qui permet de préparer une base des données du flux des entrées-sorties des procédés de fabrication utilisés pour la gamme de fabrication du produit étudié.

2. Optimisation multi objectifs

2.1. Optimisation pour l'éco-fabrication

Le couplage entre le gain économique et la minimisation des émissions néfastes est le pilier principal de l'éco-fabrication. Donc, ce problème est à caractère multi objectifs avec respect de certaines contraintes.
Lors d'un procédé de fabrication, les émissions sont dues généralement à trois éléments principaux : l'énergie, les matériaux et le process.
Ainsi, suite à la modélisation de ces trois bilans de fabrication, l'optimisation a pour objectif la minimisation de l'empreinte écologique à chaque opération de fabrication du produit tout en pensant au gain économique. Et c'est dans ce sens que s'intègre l'optimisation multi objectifs qui constitue une aide à la décision technologique permettant la fabrication du produit en respectant l'environnement sans augmenter les dépenses économiques.

Dans cette approche de modélisation, le pilier énergétique représente l'axe de progression pour l'amélioration écologique des procédés de fabrication.

Ainsi, les fonctions objectives peuvent être résumées comme suit :

- Une fonction économique : généralement elle englobe le temps de production ainsi que le coût de production.
- Une fonction écologique : elle résume les bilans énergétiques ainsi que matériaux durant les opérations de fabrication.
- Une fonction technologique : elle peut être additionnée comme étant une fonction supplémentaire pour garantir la qualité du produit et la faisabilité technique.

La formulation de la fonction énergétique est basée sur les notions suivantes : énergie directe, énergie indirecte et énergie auxiliaire.

Énergie directe : Les Procédés de fabrication unitaires ont été l'objet des travaux de mécanique et des réactions chimiques pour un effort visant à modifier une ou plusieurs caractéristiques de son stade initial (US NRC, 1995). Matériaux, produits chimiques, électricité, carburant sont les entrées primaires examinées lors de l'analyse des processus. Ainsi, l'énergie est un élément clé dans le développement de la société moderne; elle favorise la croissance économique et améliore la qualité de vie. En raison de notre forte dépendance à l'énergie, il ya une préoccupation croissante sur la disponibilité de l'énergie et son impact. L'électricité est encore produite à partir de sources à base de carbone, comme le charbon, le pétrole et le gaz, elle représente plus que la moitié des émissions de gaz à effet de serre de la population mondiale. À ce niveau, on définit l'énergie directe comme étant celle consommée par la machine lors de son fonctionnement.

Énergie auxiliaire : On définit l'énergie auxiliaire comme étant l'énergie consommée par un élément d'addition lors du fonctionnement de la machine ou de l'opération : telle que la lubrification, le mécanisme de nettoyage…

Énergie indirecte : Elle est définie comme étant l'énergie nécessaire à la mise des bonnes conditions pour la fabrication telles que : l'électricité pour l'éclairage, la climatisation, énergie pour le stockage de la matière première, énergie pour le stockage du produit fini…

Mathématiquement, un problème d'optimisation est exprimé comme une fonction objectif à une ou plusieurs variables, pour être maximisé ou minimisé sous un certain nombre de contraintes indiquées. Les fonctions de contraintes définissent le domaine acceptable des variables pour le processus d'optimisation. De telles contraintes, pouvant être de types égalité ou inégalité, permettent la limitation des domaines sur les variables, dans la recherche de la (ou les) solution optimale (s).
L'équation suivante exprime la forme mathématique générale d'un problème d'optimisation. Dans cette équation f (x) est l'expression mathématique de la fonction objectif (ou critère d'optimisation ou fonction économique) avec le vecteur $x \epsilon R^n$ a pour composantes $(x_1, x_2, \dots \dots .., x_n)$ qui sont les variables (ou inconnues) du problème.

Minimiser $f(x)$ tel que : x$\in s \subset R^n$ sous les fonctions contraintes :

$$\begin{cases} g_j(\mathrm{x}) \leq 0 \quad \text{pour j=1,…. M} \\ h_i(\mathrm{x})=0 \quad \text{pour i=1,…... L} \\ x_p\min \leq x_p \leq x_p\max \text{ pour p=1,…, n} \end{cases}$$

2.2. Méthodologie et outils d'optimisation multi objectifs

Si les méthodes de résolution exactes permettent d'obtenir une solution dont l'optimalité est garantie, dans certaines situations, on peut cependant chercher des solutions de bonne qualité, sans garantie d'optimalité, mais au profit d'un temps de calcul plus réduit. Pour cela, on applique des méthodes appelées méta heuristiques, adaptées à chaque problème traité, avec l'inconvénient de ne disposer en retour d'aucune information sur la qualité des solutions obtenues.
Les heuristiques ou les méta-heuristiques exploitent généralement des processus aléatoires dans l'exploration de l'espace de recherche pour faire face à l'explosion combinatoire engendrée par l'utilisation des méthodes exactes. En plus de cette base stochastique, les méta-heuristiques sont le plus souvent itératives, ainsi le même processus de recherche est répété lors de la résolution. Leur principal intérêt provient justement de leur capacité à éviter les minima locaux en admettant une dégradation de la fonction objective au cours de leur progression.
L'optimisation combinatoire (OC) occupe une place très importante en recherche opérationnelle et en informatique. De nombreuses applications pouvant être modélisées sous la forme d'un problème d'optimisation combinatoire (POC) telles que le problème du voyageur de commerce, l'ordonnancement de tâches, le problème de la coloration de graphes, etc.

Pour l'optimisation multi objectifs dans la fabrication, plusieurs algorithmes et approches ont été utilisés. L'algorithme génétique (AG) a été développé pour la résolution de l'optimisation multi objectifs dans certains procédés d'usinage. (Zitzler et al, 2003 ;Cus et Balic, 2003 ;Sravasan et al, 2002).

Ainsi, pour l'optimisation des paramètres de coupe en fraisage (Liu et Wang, 1999) ont modifié les AG pour traiter ce problème.

D'autres algorithmes ont été développé tels que 'recuit simulé ' et 'recuit simulé parallèle' pour l'optimisation en fraisage. (Wang et al, 2005).

Au début, l'augmentation de la productivité en réduisant les coûts et en maintenant une haute qualité représente les principaux défis des fabricants. La sélection des paramètres des procédés représente une étape primordiale pour répondre à ces objectifs (Zuperl. U et al, 2005). Beaucoup de chercheurs ont étudié l'effet de la sélection optimale des paramètres pour certains cas de procédés tels que l'usinage : fraisage, tournage… [(Kopac. J, 2005) ; (Cus. F et al, 2006)].

L'aspect multi objectifs de la sélection a poussé à résoudre ce problème d'optimisation en s'aidant de certains outils mathématiques traditionnelles tels que : la programmation linéaire, la programmation géométrique, la programmation dynamique… ces techniques ont été appliqués pour le cas d'usinage, mais ils ont montré une insuffisance au niveau de robustesse ainsi que la précision des résultats de ce type de problématique. Ce point faible de ces techniques dû à un grand nombre de contraintes et des différents objectifs cherchés à chaque fois.

Compte tenu des inconvénients des méthodes classiques d'optimisation, des tentatives sont faites dans le cadre de l'amélioration de la résolution de la problématique d'optimisation des paramètres des procédés de fabrication. Cette amélioration a été à base des algorithmes évolutionnaires. Ces derniers sont dans la plupart des cas, à base de l'évolution biologique ou naturelle telle que les algorithmes génétiques et les essaims particulaires. Au début, les algorithmes génétiques représentent les techniques les plus couramment utilisés. Cependant, AG fournit une solution une solution proche de l'optimum pour un problème complexe ayant un grand nombre de variables et de contraintes. Ceci est principalement dû à la difficulté de détermination des paramètres de contrôle optimaux tels que la taille de la population, le taux de croisement, la mutation…

Par conséquent, les efforts se poursuivent pour utiliser des algorithmes d'optimisations plus récents qui sont plus robustes, plus performants et en mesure de fournir une solution plus précise (Karaboga. D et Basturk. B, 2008).

Ainsi, l'optimisation par essaim particulaire a été appliquée à certains procédés de fabrication avec succès tels que : soudage par friction, usinage électrochimique, usinage laser, perçage, fraisage… [(Yildiz. A.R et al, 2009) ; (Ciurana. J et al, 2009) ; (Cus. F et al, 2007) ; (Zhai. J et al, 2006)].

La détermination des paramètres optimaux de tous procédés d'usinage ou de fabrication est généralement une tâche difficile où les aspects suivants sont requis : la connaissance des processus de fabrication, des équations empiriques pour développer des contraintes réalistes, la spécification des capacités de la machine-outil, élaboration des critères efficaces d'optimisation et la connaissance des techniques numériques d'optimisation.

Avec le développement des techniques citées précédemment, les résultats montrent une amélioration de la précision des paramètres pour les différents procédés étudiés. En général, l'objectif a été le gain économique en respectant les contraintes technologiques [(Xue. X et Gu.Y, 2010) ; (Shutong. XIE et Yinbiao. GUO, 2011) ; (Sharma. AVNL et al, 2012)].
Dans l'objectif d'intégrer les notions de durabilité, certains travaux ont débuté par la prise en considération de l'énergie consommée pour la production du produit étudié (Diaz. N et al, 2010). Cette idée a été couplée avec des études expérimentales traitant les différents paramètres qui influent au niveau de la consommation de la puissance dans certains procédés de fabrication [(Rangarajan. A et Dornfeld. D, 2004) ; (Diaz. N et al, 2009) ; (Inamasu. Y et al, 2010) ; (Diaz. N et al, 2011)].
Ces travaux nous amènent à un point de départ dans le cadre de l'éco-fabrication : l'intégration d'une fonction environnementale comme objectif à atteindre lors de l'étude de la phase de fabrication.
C'est dans ce cadre que s'intègrent nos travaux à travers l'approche produite. Notre objectif de l'intégration de l'optimisation multi objectifs est la prise en considération de l'écologie comme étant objectif et non pas comme contrainte.

2.3. Optimisation par Essaim Particulaire (OEP)

En 1995, Russel Eberhart, ingénieur en électricité et James Kennedy, socio-psychologue, s'inspirent du monde des vivants pour mettre en place une méta-heuristique : l'optimisation par essaim particulaire. Cette méthode se base sur la collaboration des individus entre eux : chaque particule se déplace et à chaque itération, la plus proche de l'optimum communique aux autres sa position pour qu'elles modifient leur trajectoire. Cette idée veut qu'un groupe d'individus peu intelligents puisse posséder une organisation globale complexe.
De par sa récence, de nombreuses recherches sont faites sur les O.E.P,, mais la plus efficace jusqu'à maintenant est l'élargissement au cadre de l'optimisation combinatoire. En effet, en 2000, Maurice Clerc, un chercheur de France Telecom met en place la D.P.S.O (Discrete Particle Swarm Optimization), en remplaçant les points par des ordonnancements et les fonctions continues par des fonctions d'évaluation.

2.3.1. Présentation de l'OEP

Motivation de l'OEP

Pour les problèmes d'optimisation, on cherche généralement des solutions qui s'approchent de la solution souhaitée d'où le recours aux méthodes dites 'heuristiques'.
On retrouve parmi ces heuristiques, certains algorithmes qui possèdent un principe générique adaptable et qui s'applique donc à plusieurs problèmes d'optimisation. On les appelle des métas heuristiques. La plus courante est la descente stochastique : on part d'une solution initiale, on la compare à tous ses voisins en conservant à chaque fois le *meilleur* résultat. L'optimisation par essaim particulaire, qui dérive de la descente stochastique, entre dans cette famille d'algorithmes. Elle s'inspire fortement des relations grégaires des oiseaux migrateurs qui doivent parcourir des longues distances et qui doivent donc optimiser leurs déplacements en termes d'énergie dépensée, par exemple la formation en V.

Éléments de l'OEP

Pour appliquer l'OEP, il faut définir un espace de recherche constitué de particules et une fonction objective à optimiser. Le principe de l'algorithme est de déplacer ces particules afin qu'elles trouvent l'optimum. Chacune de ces particules est dotée :

- D'une position, c'est-à-dire ses coordonnées dans l'ensemble de définition.
- D'une vitesse qui permet à la particule de se déplacer. De cette façon, au cours des itérations, chaque particule change de position. Elle évolue en fonction de son meilleur voisin, de sa meilleure position, et de sa position précédente. C'est cette évolution qui permet de tomber sur une particule optimale.
- D'un voisinage, c'est-à-dire un ensemble de particules qui interagissent directement sur la particule, en particulier celle qui a le meilleur critère.

À tout instant, chaque particule connait :

- Sa meilleure position visitée. On retient essentiellement la valeur du critère calculée ainsi que ses coordonnées.
- La position du meilleur voisin de l'essaim qui correspond à l'ordonnancement optimal.
- La valeur qu'elle donne à la fonction objectif, car à chaque itération il faut une comparaison entre la valeur du critère donnée par la particule courante et la valeur optimale.

L'évolution d'une particule est finalement une combinaison de trois types de comportements :

- Égoïste (suivre sa voie suivant sa vitesse actuelle),
- Conservateur : revenir en arrière en prenant en compte sa meilleure performance
- Panurgien : suivre aveuglément le meilleur de tous en considérant sa performance.

On voit alors que la bio-inspiration à l'origine de l'optimisation par essaim particulaire ressort dans l'algorithme sous la forme d'une intelligence collective : coordination du groupe, instinct individuel et interaction locale entre les individus (grognements, phéromones…).

2.3.2. Notion de voisinage

Le voisinage d'une particule est le sous-ensemble de particules de l'essaim avec lequel il a une communication directe. Ce réseau de rapports entre toutes les particules est connu comme la sociométrie, ou la topologie de l'essaim.

La figure 3.3 représente la notion de voisinage au niveau de l'optimisation par essaim particulaire. L'OEP est un algorithme à population. Il commence par une initialisation aléatoire de l'essaim dans l'espace de recherche. À chaque itération de l'algorithme, chaque particule est déplacée suivant (3.1) et (3.2). Une fois le déplacement des particules effectué, les nouvelles positions sont évaluées. Les $best_{particule}$(t) ainsi que $best_{voisin}$(t) sont alors mis à jour. Cette procédure est résumée par l'algorithme (figure. 3.4).

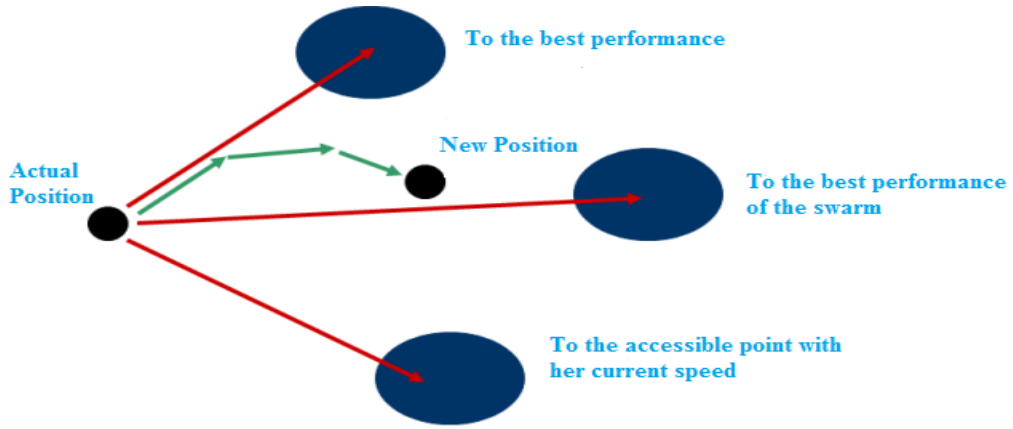


Figure 3.3. *Notion de voisinage*

Il existe deux principaux types de voisinage :

1) Les voisinages géographiques : les voisins sont considérés comme les particules les plus proches. Cependant, à chaque itération, les nouveaux voisins doivent être recalculés à partir d'une distance prédéfinie dans l'espace de recherche. C'est donc un voisinage dynamique.
2) Les voisinages sociaux : les voisins sont définis à l'initialisation et ne sont pas modifiés ensuite. C'est le voisinage le plus utilisé, pour plusieurs raisons :

- Il est plus simple à programmer.
- Il est moins coûteux en temps de calcul.
- En cas de convergence, un voisinage social tend à devenir un voisinage géographique.

Pour ce faire, on dispose (virtuellement) les particules en cercle puis, pour la particule étudiée, on inclut progressivement dans ses informatrices, d'abord elle-même, puis les plus proches à sa droite et à sa gauche, jusqu'à atteindre la taille voulue. On peut aussi choisir les informatrices au hasard.

2.3.3. L'OEP pour l'optimisation continue

Principe

On s'intéresse dans cette partie à présenter l'application de cette méthode pour les fonctions continues.

L'algorithme de base de l'OEP (figure 3.4) travaille sur une population appelée *essaim* de solutions possibles, elle-même appelée particules. Ces particules sont placées aléatoirement dans l'espace de recherche de la fonction objectif.

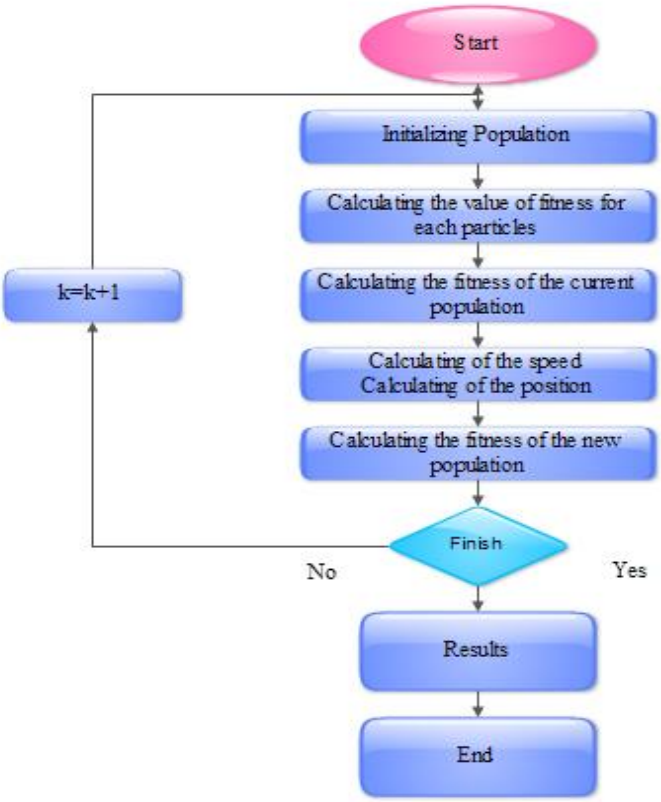


Figure 3.4. *Algorithme OEP*

À chaque itération, les particules se déplacent en prenant en compte leur meilleure position (déplacement égoïste), mais aussi la meilleure position de son voisinage (déplacement panurgien).
Dans les faits, on calcule la nouvelle vitesse à partir de la formule suivante :

$$V_{k+1} = c_1 * V_k + c_2 * \left(best_{particule} - position_{particule}\right) + c_3 * \left(best_{voisin} - position_{particule}\right) \quad (3.1)$$

Avec :
V_{k+1} et V_k sont les vitesses de la particule aux itérations k et k+1.
$best_{particule}$ est la meilleure position de la particule.
$best_{voisin}$ est la meilleure position de son voisinage à l'itération k.
$position_{particule}$ est la position de la particule à l'itération k.
c_1 , c_2, c_3 sont des coefficients fixés, c_2 est généré aléatoirement à chaque itération et en général $c_2 = c_3$
On peut ensuite déterminer la position suivante de la particule grâce à la vitesse que l'on vient de calculer :

$$X_{k+1} = X_k + V_{k+1} \quad (3.2)$$

Où :
X_k est la position de la particule à l'itération k.
On génère X_0 et V_0 au début de notre algorithme.

Configuration de la méthode

Pour aboutir à une modélisation convenable de la méthode, il est nécessaire de définir convenablement les paramètres suivants :

1) Taille de l'essaim : La quantité de particules allouées dépend essentiellement de deux paramètres : la taille de l'espace de définition, et le rapport entre la capacité de calcul de la machine et le temps maximum de recherche. Le meilleur moyen d'affiner ce coefficient est donc de faire de nombreux essais afin de se doter de l'expérience nécessaire
2) Initialisation de l'essaim : elle est généralement faite aléatoirement suivant une loi uniforme sur [0,1], cependant une répartition homogène des particules est préférable
3) Les coefficients de confiance c_2 et c_3 : Ils permettent de pondérer les tendances des particules à suivre leur instinct de conservation ou leur panurgisme. De manière générale, ces variables aléatoires sont évaluées à chaque itération suivant une loi uniforme sur le domaine de définition.
4) Le coefficient d'inertie c_1 : Il permet de définir la capacité d'exploration de chaque particule en vue d'améliorer la convergence de la méthode. Fixer ce paramètre revient à trouver un compromis entre une exploration globale ($C_1 > 1$) et une exploration locale ($C_1 < 1$). Il représente l'instinct aventureux de la particule.
5) Critère d'arrêt : la convergence vers la solution optimale globale n'est pas garantie dans tous les cas. Il est donc important de doter l'algorithme d'une porte de sortie en définissant un nombre maximum d'itérations. Le programme s'arrête alors si et seulement si le nombre maximum d'itérations est atteint ou que la valeur du critère obtenue est acceptable pour l'utilisateur.

2.3.4. Mise en œuvre de l'OEP pour l'éco-fabrication

On applique dans le cadre de nos études l'optimisation par essaim particulaire avec des bornes de contraintes. Donc, l'espace de recherche $S = [lb_1\ ub_1] \times [lb_2\ ub_2] \times \ldots \times [lb_n\ ub_n]$ est définie par n paramètres réels $(x_1 \ldots, x_n)$ où chaque paramètre x_i $(1 \leq i \leq n)$ est compris dans un intervalle défini au début de l'étude $[lb_i\ ub_i]$.

Chaque individu noté comme particule se déplace suivant l'espace de recherche de dimension n en tenant compte de la fonction objectif.

Ainsi, chaque particule i possède une position et une vitesse de déplacement ainsi qu'une mémorisation de la meilleure position visitée durant l'itération. D'où chaque particule est capable de se communiquer avec les autres particules notées voisines.

À chaque itération, on calcule la nouvelle position ainsi que la vitesse en s'aidant de la meilleure position déjà retenue jusqu'à atteindre le critère d'arrêt.

2.3.5. Approches des poids d'agrégation

En se basant sur ces approches, les objectifs sont sommés avec une combinaison de poids de pondération. Ces poids peuvent être fixes ou dynamiques durant la procédure d'optimisation.

Dans le cas du problème multi objectifs, l'agrégation représente une étape importante traduisant la décision ou l'intervention du décideur.
On distingue plusieurs approches dans ce cadre : 'Conventional weighted aggregation (CWA)', 'Bang –Bang weighted aggregation (BWA)', 'Dynamic weighted aggregation (DWA)'…

2.4. Les Algorithmes génétiques

Les AG, qui tirent leur nom de l'évolution biologique des êtres vivants dans le monde réel, cherchent à simuler le processus de la sélection naturelle dans un environnement défavorable en s'inspirant de la théorie proposée par C.Darwin.
Dans un environnement, « les individus » les mieux adaptés tendent à vivre assez longtemps pour se reproduire alors que les plus faibles ont tendance à disparaître.

2.4.1. Principe méthodologique

Les AG reposent sur le principe suivant : 'Évolution d'un ensemble de solutions candidates, appelé « population d'individus »'.
Un individu représente une solution possible du problème à résoudre et on suit les étapes suivantes :

- On attribue à chaque individu une fonction d'adaptation appelée : 'fitness'. Cette dernière permet de mesurer sa qualité.
- On sélectionne les meilleurs individus de cette population.
- On applique le croisement et la mutation pour ces individus pour aboutir à une nouvelle population de solution.
- On poursuit à chaque génération jusqu'à ce qu'on atteint le critère d'arrêt.

La figure 3.5 présente les étapes de l'algorithme génétique de base.

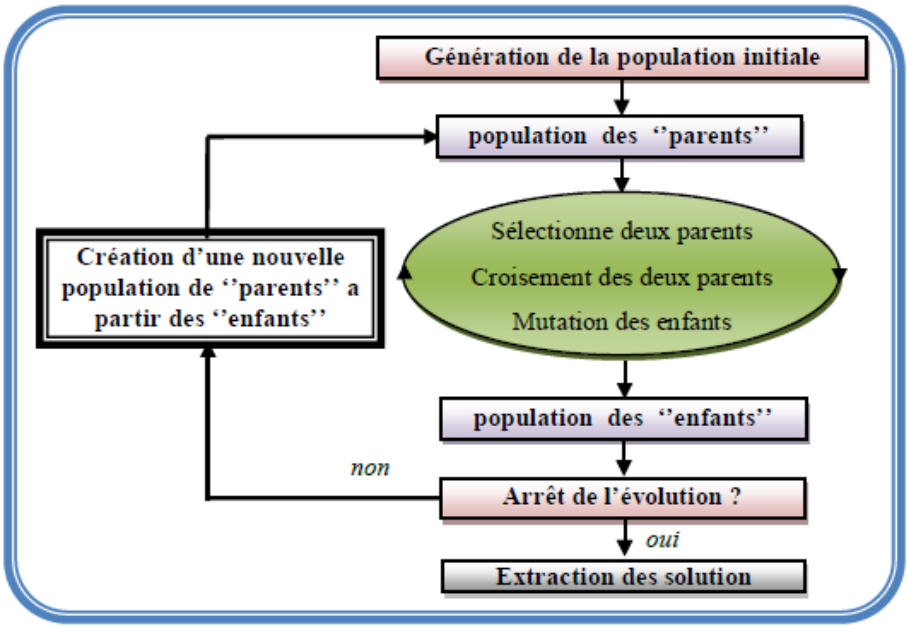


Figure 3.5. *Algorithme de base des AG*

Remarque : Il existe de nombreuses méthodes pour la sélection, le croisement et la mutation.

2.4.2. Paramètres d'un AG

Pour l'application d'un AG dans un problème réel, on doit définir les éléments suivants :

1) Un codage des éléments appartenant à la population.
2) Une fonction d'adaptation qui permet de mesurer la qualité de l'individu.
3) Un processus d'évolution des générations.
4) Des opérateurs pour modifier les individus d'une population de la génération (t) à la génération ($t+1$) comme le croisement et la mutation.
5) Les opérateurs déjà présentés dépendent de plusieurs paramètres qui sont fixés à l'avance et dont dépend la convergence de l'algorithme :

- La taille de la population : si la taille est trop petite, l'AG peut ne pas converger, par contre si elle est trop grande, l'évaluation des individus peut être très longue.
- Probabilité de croisement et de mutation : les valeurs de ces probabilités peuvent varier d'une application à une autre.
- Critère d'arrêt : c'est-à-dire le nombre maximal de générations à effectuer.

2.4.3. Les AG pour l'optimisation multi objectifs

Optimisation multi objectifs

Dans un problème multi objectifs, il ya plus qu'une fonction objectif et chacune d'entre elles peut avoir une solution optimale différente.

Le but d'un problème multi objectif est de trouver de « bon compromis » plutôt qu'une seule solution. Ainsi, lorsqu'il ya plusieurs objectifs, la notion d'optimum change et il est préférable d'utiliser un autre terme : 'optimum de Pareto'.

En effet, au lieu d'une solution unique, ce type d'optimisation donne lieu à un ensemble de solutions optimales. Ces derniers sont « optimales » dans le sens qu'aucune amélioration ne peut être faite sur un critère de cette solution sans dégrader au moins la valeur d'un autre critère.

AG pour l'optimisation multi objectifs

Les AG développés dans ce sens tendent à satisfaire les deux points suivants :

- Trouver des solutions aussi proches que possible des vraies solutions 'Pareto optimales'.
- Trouver un ensemble de solutions très variées tout le long du front.

Pour aboutir à l'optimisation multi objectifs, Schaffer a proposé la VÉGA (Vector Evaluated Genetic Algorithm) en 1985. Cet algorithme est basé sur le principe suivant :
On considère une population de N individus qui sont répartis en *k* sous-population où chaque valeur de k représente un objectif à optimiser. À chaque génération, un nombre de sous populations est généré par sélection en fonction de l'objectif k. Ensuite, ces sous-populations

sont regroupées pour former une nouvelle population de N individus et les opérateurs de mutation et croisement sont appliqués.
Malgré son implantation facile, cet algorithme présente l'inconvénient de la proposition des solutions qui favorise un seul objectif sans tenir compte des autres.
À partir de la VÉGA, plusieurs algorithmes ont été développés.

Niched Pareto Genetic Algorithm : NPGA

Basé sur la dominance de Pareto (Horn et al, 1994), ont proposé NPGA comme étant un algorithme utilisant une sélection par tournoi. Il diffère par rapport à un AG standard au niveau de la méthode de sélection.
À chaque tournoi, deux individus candidats sont sélectionnés aléatoirement de la population initiale. Ainsi, on sélectionne un ensemble d'individus dans la population pour ne pas limiter la comparaison à ces deux choisis.
Les deux candidats sélectionnés sont comparés à chaque individu de l'ensemble de comparaison.

- Si l'un des deux candidats est dominé par l'ensemble, et le second ne l'est pas, ce dernier est sélectionné pour la reproduction.
- Si les deux candidats sont dominés ou non dominés, il faut passer à l'utilisation de la technique basée sur la fonction de partage pour choisir le candidat gagnant.

Fonction de partage

La difficulté d'un AG est que l'individu ayant une très bonne fonction d'adaptation a tendance à se multiplier aux dépens des autres individus de la population. Ainsi, dans les fonctions multimodales, on essaie d'avoir plusieurs optimums et non pas un seul optimum localisé. D'où la proposition de la fonction de partage qui a pour rôle la distribution de la population d'individus sur les différents pics de l'espace de recherche.

En effet, la fonction d'adaptation de chaque individu (i) est dégradée par un compteur de niche (m_i), calculé pour ce même individu. Donc, le partage permet de dégrader la fonction d'adaptation d'un individu par rapport au nombre d'individus semblables dans la population.

La nouvelle fonction de partage calculé '*shared fitness'* est obtenue en divisant la fonction d'adaptation de l'individu par le compteur de niche.

Le compteur de niche m_i donne une estimation du nombre d'individus qui se trouvent dans le voisinage de l'individu (i). Ce coefficient est calculé pour tous les individus (j) de la population courante (Pop) :

$$m_i = \sum_{j \in Pop} Sh[d[i,j]] \tag{3.3}$$

Où :

D[i,j] : Distance entre l'individu i et j

Sh[d[i,j]] : fonction décroissante de d[i,j], tel que : Sh[0]=1 et Sh[d≥ σ_{share}]=0

La fonction Sh[d], la plus communément utilisée, est la fonction triangulaire définie comme suit :

$$Sh[d] = \{1 - \frac{d}{\sigma_{share}}\} \; si \; d \leq \sigma_{share} \tag{3.4}$$

0 sinon

Où :σ_{share} : rayon de niche, fixé dans la plupart des cas par l'utilisateur en fonction de la distance minimale de séparation voulue entre les différents pics.

Ce qui est plus important dans ce qui est présenté est le compteur de niche de chaque individu. Entre deux individus qui ne sont ni dominés ni non dominés, l'individu ayant le plus petit compteur de niche est sélectionné, de la sorte il est possible de maintenir une diversité le long du front de Pareto.

Ainsi (Horn et al, 1994), ont trouvé que l'utilisation d'une sélection et partage de la fonction peut amener à des perturbations dans la composition de la population. D'où, ils ont proposé que le calcul du compteur de niche se fasse avec la population « partiellement remplie de la génération suivante » et non pas avec les individus de la population courante.

Distance entre deux individus

On peut définir la distance entre deux individus, $d[x, y]$, dans l'espace des objectifs ou dans l'espace de recherche. Ce choix dépend de la nature de problème.

Pour déterminer cette distance dans l'espace des objectifs, on définit la relation suivante :

$$d[x, y] = (\sum_{i=1}^{n} |x_i - y_i|^p)^{1/p} \tag{3.5}$$

Où :

x_i, y_i : Valeurs de l' $i^{ème}$ objectif

p : Paramètre de la distance, si *p=2*, la formule définit une distance euclidienne.

Avantages et inconvénients du NPGA

Cet algorithme est plus rapide que les autres algorithmes basés sur le tri, car NPGA n'est pas basé sur le classement de Pareto de tous les individus de la population, mais seulement une partie à chaque génération.

Par contre, le principal inconvénient est qu'il nécessite, en plus de spécifier le facteur de partage (σ_{share}), un paramètre supplémentaire qui est la taille de tournoi (t_{dom}).

Niched Pareto Genetic Algorithm 2: (NPGA 2)

Cet algorithme, qui a été développé par (Erickson et al, 2001), est basé sur le degré de domination d'un individu.
Comme dans l'AG standard, on utilise la sélection par tournoi, mais on se base sur le classement de Pareto pour la sélection de l'individu gagnant du tournoi.
La variable qui contrôle la sélection des compétiteurs est la taille du tournoi :

1) On débute par la sélection aléatoire d'un groupe de compétiteur de la population.
2) On sélectionne le candidat qui a le plus petit rang (donc le moins dominé) comme étant gagnant du tournoi.
3) Dans le cas où aucun candidat n'est pas préférable aux autres, alors on utilise la technique de partage pour identifier le gagnant tel qu'on sélectionne celui qui a le plus petit compteur de niche

(Erickson et al, 2001), ont suggéré l'ajustement de mesure de fonctions objectives pour amener les valeurs des fonctions dans le même intervalle afin de déterminer la valeur du rayon de niche. Ils ont présenté comme exemple la relation suivante :

$$F_i' = \frac{F_i - F_{i,min}}{F_{i,max} - F_{i,min}} \tag{3.6}$$

Où
$F_i', F_{i,min} et\ F_{i,max}$: Valeurs de la fonction ajustée, le minimum et le maximum de l'objectifF_i, respectivement.

Tri par non-domination: (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II (NSGA-II))

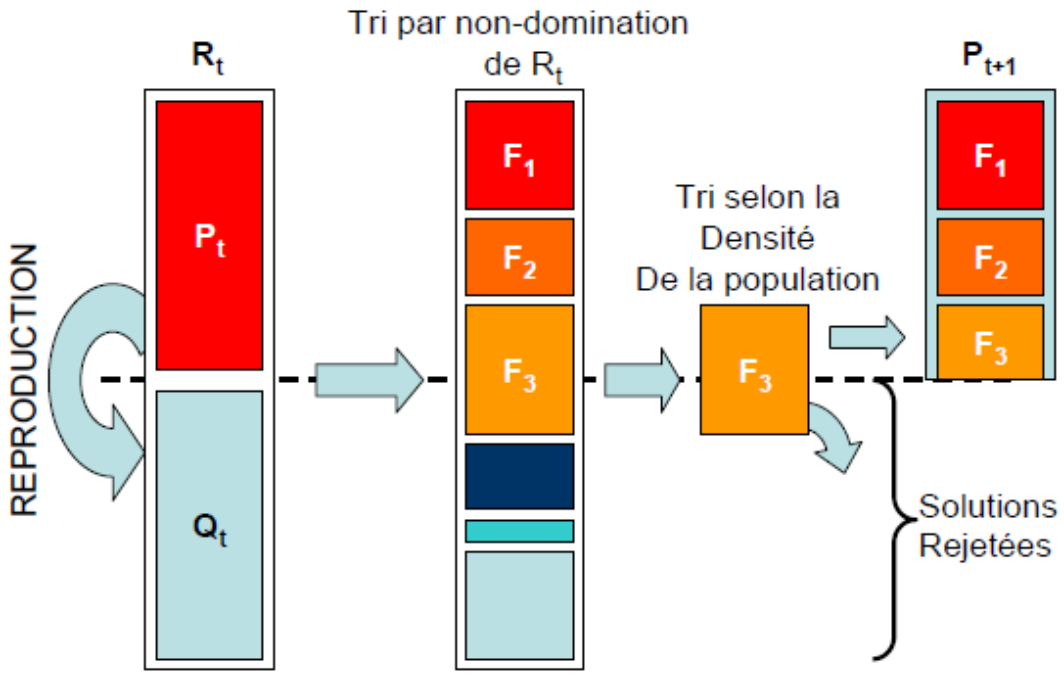


Figure 3.6. *Algorithme NSGA II*

Proposé par (Deb et al, 2002), cet algorithme est plus efficace que son prédécesseur, car :

- Il utilise une approche élitiste qui permet de sauvegarder les meilleures solutions trouvées lors des générations précédentes.
- Il utilise une procédure de tri basée sur la non-dominance, plus rapide.
- Il ne nécessite aucun réglage de paramètre.
- Il utilise un opérateur de comparaison basé sur un calcul de la distance de *crowding.*

Cet algorithme peut être décrit comme suit (figure 3.6) :

- Assemblage d'une population de parents (P_i) de taille (N) et une population d'enfants (Q_i) de taille (N) pour former une population (R_i=$P_i \cup Q_i$). Cet assemblage assure l'élitisme.
- La population obtenue de taille (2N) sera triée selon un critère de non-dominance pour identifier les différents frontsF_1,F_2,… ainsi, les meilleurs individus vont se retrouver dans le ou les premiers fronts.
- On obtient une nouvelle population parents (P_{i+1}) en ajoutant les fronts au complet tant que ceux-ci ne dépassent pas N.
- Si le nombre d'individus présents dans (P_{i+1}) est inférieur à (N), on applique la procédure de crowding sur le premier front suivant (F_i) non inclus dans (P_{i+1}). L'objectif de cet opérateur est d'insérer les meilleurs individus manquants dans la population (P_{i+1}).
- Après l'identification des individus de la population (P_{i+1})., une nouvelle population enfant (Q_{i+1}) est créée par sélection, croisement et mutation.
- Le processus se continue, d'une génération à la suivante, jusqu'à un critère d'arrêt.

Selon (Deb et al, 2002), on peut résumer cet algorithme comme suit :

Pour chaque itération t faire :

$R_t = P_t \cup Q_t$ (combiner les deux populations)

F=fast-non-dominated-sort (R_t) (Calcul de tous les fronts non dominés de R_t)

$P_{t+1} = \emptyset$

i=1

Tanque $|P_{t+1}| + |F_i| \leq N$ (tanque la population n'est pas pleine)

i=i+1

$P_{t+1} = P_{t+1} \cup F_i$ (Inclure le $i^{ème}$front non dominé dans P_{t+1})

Crowding-distance-assignment (F_i) (Calculer la distance de 'crowding' du front F_i)

Sort ($F_i, <_n$) (trier dans un ordre descendant en utilisant l'opérateur de comparaison $<_n$)

$P_{t+1} = P_{t+1} \cup F_i[1: (N - |P_{t+1}|)]$ (choisir les premiers (N-$|P_{t+1}|$) individus du front les mieux répartis)
générer une nouvelle population enfant (Q_{i+1}) par sélection, croisement et mutation
$t = t + 1$ (incrémenter le compteur des générations)

Distance de Crowding

Pour une solution (i), le calcul de cette distance dépend du périmètre formé par les points les plus proches de (i) sur chaque objectif. On procède comme suit :

1) Tri des solutions selon chaque objectif, dans un ordre ascendant.
2) Pour les individus possédant les valeurs limites (la plus petite et la plus grande valeur de fonction d'objectif), on associe une distance infinie.
3) Pour les autres solutions intermédiaires, on détermine la distance de Crowding qui est égale à la différence normalisée des valeurs de fonctions objectives de deux solutions adjacentes. Ce calcul se fait pour chaque fonction objective.
4) La distance de Crowding est calculée en sommant les distances correspondantes à chaque objectif.

2.5. Choix et mise en place de l'essaim particulaire pour l'optimisation en éco-fabrication

Dans le cadre du développement des outils et algorithmes d'optimisation, certains auteurs ont pensé à la comparaison des différents outils mis en évidence pour la résolution du problème d'optimisation.

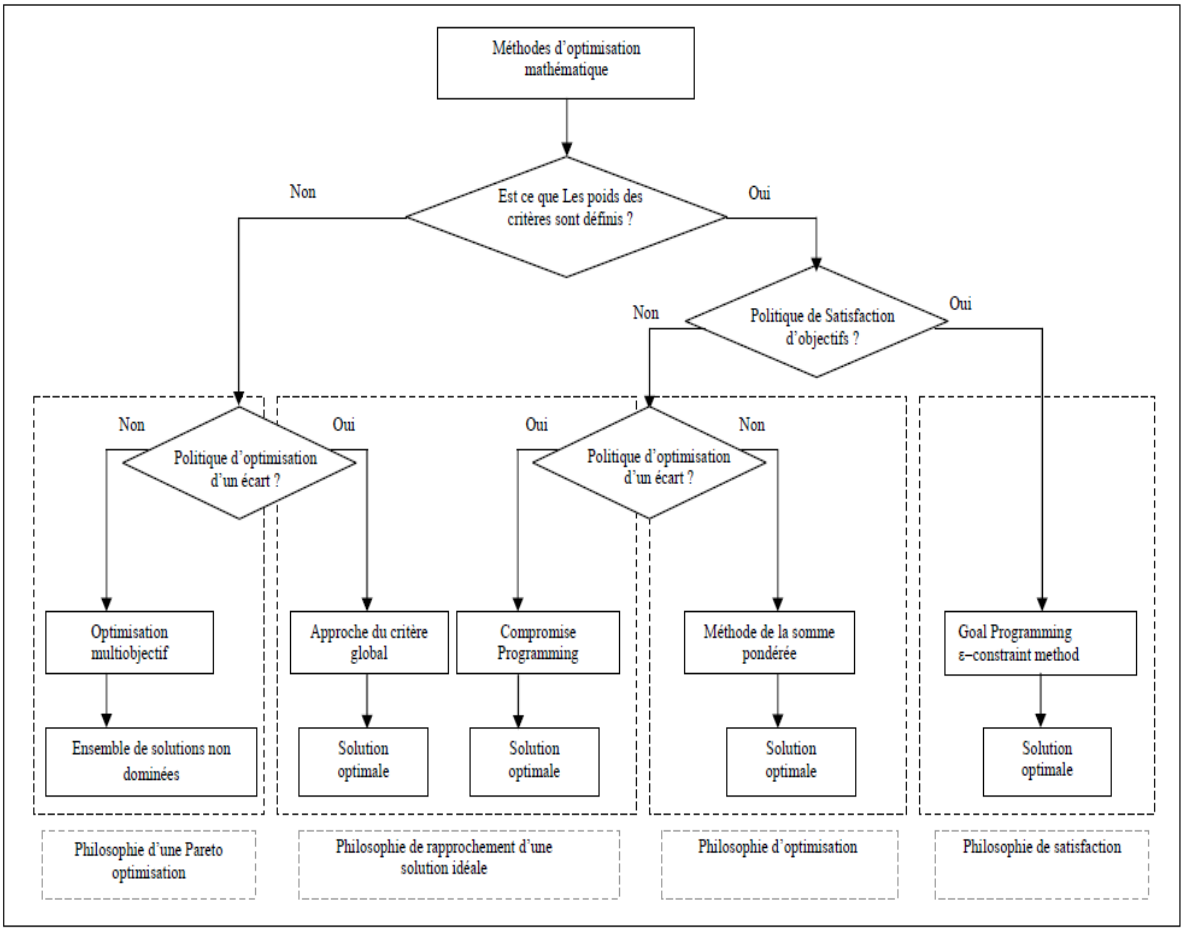


Figure 3.7. *Processus de choix d'une méthode d'optimisation (Hammami. A, 2003)*

(Baskar et al, 2005) a comparé les performances de 4 méthodes de résolution qui sont : colonie de fourmis, les algorithmes génétiques, les essaims particulaires et recherche tabou. Ces algorithmes ont été appliqués pour la détermination des paramètres de coupes optimales en usinage. Les résultats de cette comparaison ont montré que l'essaim particulaire est le plus performant par rapport aux autres algorithmes utilisés. Ainsi, pour la précision des résultats, l'algorithme génétique et l'essaim particulaire diffèrent de 4%.
Comme synthèse à l'ensemble des méthodes que nous avons détaillé, nous présentons dans la Figure 3.7 une procédure pour le choix d'une méthode d'optimisation mathématique.

En s'aidant du processus détaillé à la figure 3.7 et les résultats présentés ainsi qu'autres travaux, on constate l'efficacité et la performance de l'essaim particulaire pour la résolution des problèmes multi objectifs. On se propose d'appliquer cet outil robuste pour notre approche d'étude et la mise en évidence de cet algorithme dans le cadre de l'éco-fabrication. Ainsi, on se propose de valider la précision des résultats à l'aide d'une étude comparative avec les algorithmes génétiques.
Suite à ce niveau, les procédés optimaux pour chaque opération de fabrication du produit sont préparés. Ces paramètres tendent à coupler les objectifs économiques et écologiques ainsi que la qualité du produit tout en respectant la faisabilité technique. Cette étape de modélisation représente une entrée importante pour la suite de l'approche. Les résultats obtenus pour cette phase de modélisation nous permettent par la suite de préparer le flux des entrées-sorties pour chaque opération de fabrication de produit étudié. Cet objectif sera la finalité de l'étape suivante de notre approche en s'aidant des algorithmes Input-Process-Output (IPO) (section 3).

3. Modélisation de la consommation des ressources

3.1. Input-Process-Output (IPO)

Un process de fabrication est la succession d'une série d'opérations de fabrication ayant pour objectif la transformation de la matière première en produit fini. Cette transformation est équipée par certaines émissions néfastes sous différentes formes : solide, liquide, gazeux…
Pour la maîtrise et la gestion de ressources consommées pour une opération de fabrication on tend à appliquer deux bilans : le bilan énergétique et le bilan matière.
Ces deux bilans permettent de représenter la loi d'entrée/sortie ou bien la relation entre les entrées et les sorties : pour la matière ainsi que pour les ressources énergétiques.

Ainsi, pour cette étape d'approche, nous avons fait recours à l'une des méthodes récemment développées : Input-Process-Output (IPO).

Figure 3.8. *Relation entre les entrées-sorties dans l'algorithme IPO*

Au début (Leontief. W, 1986) a utilisé IPO pour la modélisation des activités économiques ce qui a été très efficace dans ce domaine d'application.
Après, ce type de modèle a été développé dans le but d'une analyse environnementale des activités nationales, des activités industrielles et au niveau des processus. (Breuil. JM, 1992) a proposé un modèle d'entrée-sortie et d'analyse des émissions polluantes en France. Ainsi, dans le même cadre, Hawdon. D et Pearson. P ont étudié l'interaction et la simulation de l'énergie, l'environnement et l'économie à l'aide d'un modèle IPO en présentant des relations complexes pour plus que 10 secteurs en U.K.
Ces analyses ont permis de mieux comprendre les sources des effluents ou les polluants. Par exemple, en France, l'étude proposée a aidé à la maîtrise des émissions de NO_x et SO_2. L'objectif global est l'aide à implanter des stratégies permettant la réduction des impacts environnementaux.
Au niveau des systèmes de fabrication (Milacic. D et al, 1997) a choisi d'utiliser les modèles IPO pour caractériser les émissions écologiques issues d'un process de fabrication. Cette approche a été basée sur l'analyse de cycle de vie, dans le but d'une aide à la décision environnementale des procédés de fabrication par la maîtrise de la consommation des ressources.
Dans l'objectif d'une planification, des chaînes de production (Lin et Polenske, 1998) ont défini une approche basée sur les IPO. Cette étude permet la définition d'un réseau de relation interne entre les différentes cellules de production. Ces relations de flux aident à une analyse écologique ainsi qu'un développement économique.
En utilisant une approche similaire (Albino et al, 2000) ont formulé des entrées-sorties de process modèles de l'offre locale / globale chaînes. En particulier, considérés comme une chaîne d'approvisionnement située dans la structure économique d'une région donnée, les modèles permettent de cartographier les activités de production et de mettre en relation les flux d'estimation de l'énergie et des matériaux, y compris l'utilisation et la consommation de combustibles et de la production de polluants dans la chaîne d'approvisionnement.
(Xue. H et al, 2006) a proposé une approche d'illustration du flux des matières à l'aide du modèle IPO agrégé dans l'objectif de faciliter le choix des solutions pour minimiser les impacts. Cette étude a été appliquée pour deux scénarios de fabrication des aciers pour changer les matrices de coefficients technologiques dans le but de minimiser la consommation totale des ressources.

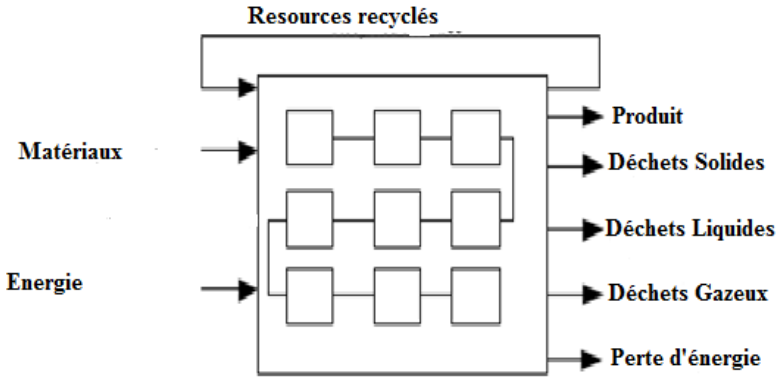


Figure 3.9. *Modélisation du flux d'entrées-sorties pour les process de fabrication*

Les relations fondamentales pour cette méthode sont données par le système d'équations suivant :

$$\begin{aligned} X_1 &= z_{11} + z_{12} + \cdots + z_{1j} + \cdots + z_{1n} + Y_1 \\ X_2 &= z_{21} + z_{22} + \cdots + z_{2j} + \cdots + z_{2n} + Y_2 \\ &\ldots \\ X_i &= z_{i1} + z_{i2} + \cdots + z_{ij} + \cdots + z_{in} + Y_i \\ &\ldots \\ X_n &= z_{n1} + z_{n2} + \cdots + z_{nj} + \cdots + z_{nn} + Y_n \end{aligned} \tag{3.7}$$

Ainsi les z_{iJ} représentent les coefficients liants les entrées aux sorties de mêmes types et les Y_i représentent les coefficients liants les entrées aux nouvelles sorties ou nouveaux éléments suites au process.
On peut définir des coefficients techniques permettant de représenter les relations entre les entrés et les sorties de chaque opération ou système d'étude tel que : $a_{ij} = {}^{z_{ij}}/_{X_j}$

	$M^*{}_1$	$M^*{}_2$	…	$M^*{}_m$	Y_1	…	Y_n
M_1	Z_{11}	Z_{12}	…	Z_{1m}	W_{11}	…	W_{1n}
M_2	Z_{21}	Z_{22}	…	Z_{2m}	W_{21}	…	W_{2n}
…	…	…	…	…	…	…	…
M_m	Z_{m1}	Z_{m2}	…	Z_{mm}	W_{m1}	…	W_{mn}

Le système d'équations déjà défini sera comme suit :

$$\begin{aligned} (1 - a_{11})X_1 - a_{12}X_2 - \cdots - a_{1n}X_n &= Y_1 \\ -a_{21}X_1 + (1 - a_{22})X_2 - \cdots - a_{2n}X_n &= Y_2 \\ &\ldots \\ -a_{n1}X_1 - a_{n2}X_2 - \cdots + (1 - a_{nn})X_n &= Y_n \end{aligned} \tag{3.8}$$

Sous une forme matricielle, on obtient :

$$(I - A)X = Y \tag{3.9}$$

Ou

$$X = (I - A)^{-1}Y \tag{3.10}$$

Au niveau d'une opération de fabrication, le bilan des matières introduit deux types des matériaux de sortie : produit semi-fini ou fini en matière de base et un nouveau matériau composé des différents matériaux d'entrées.

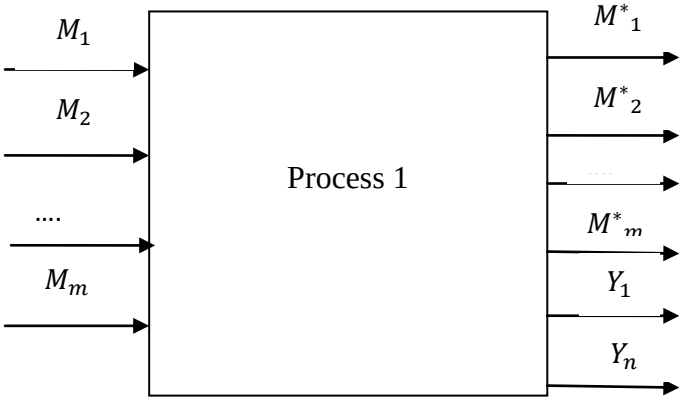


Figure 3.10. *Bilan des matériaux pour un process de fabrication*

Selon cette définition, on a :

$$x_i = z_{i1} + z_{i2} + \cdots + z_{ij} + \cdots + z_{im} + w_{i1} + w_{i2} + \cdots + w_{ij} + \cdots + w_{in} \quad (3.11)$$

$$= a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \cdots + a_{ij}x_j + \cdots + a_{im}x_m + b_{i1}y_1 + \cdots + b_{ij}y_j + \cdots + b_{in}y_n \quad (3.12)$$

x_i Représente les entrés, y_i le nouveau matériau issu de l'opération de fabrication.

a_{ij} et b_{ij} sont les coefficients techniques définis par les expressions suivantes :

$$a_{ij} = \frac{z_{ij}}{x_j} \quad (3.13)$$

$$b_{ij} = \frac{w_{ij}}{y_j} \quad (3.14)$$

En tenant compte de ces deux types de coefficients, le système global d'IPO peut être représenté comme suit :

$$\begin{aligned} x_1 &= a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1m}x_m + b_{11}y_1 + \cdots + b_{1n}y_n \\ x_2 &= a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots + a_{2m}x_m + b_{21}y_1 + \cdots + b_{2n}y_n \\ &\ldots \\ x_m &= a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \cdots + a_{mm}x_m + b_{m1}y_1 + \cdots + b_{mn}y_n \end{aligned} \quad (3.15)$$

On peut écrire ce système sous une forme matricielle tel que :

$$(I - A)X = BY \quad (3.16)$$

Avec :

$$X = [x_1\ x_2 \ldots\ x_m]^T \quad (3.17)$$

$$Y = [y_1\ y_2 \dots\ y_m]^T \tag{3.18}$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mm} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & \cdots & b_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{m1} & \cdots & b_{mn} \end{bmatrix}$$

La relation finale liant les entrées et les sorties du système est la suivante :

$$X = (I - A)^{-1}BY \tag{3.19}$$

$$Y = B^{-1}(I - A)X \tag{3.20}$$

L'analyse écologique du flux d'entré-sortie est modélisée à l'aide du critère 'empreinte carbone' qui permet de regrouper les émissions environnementales en un seul impact qui est le dioxyde de carbone. (Équivalent CO_2).
Chaque type de sortie issu de l'opération est multiplié par son facteur de pouvoir de réchauffement global (GWP). Ce dernier représente la capacité de chaque gaz à effet de serre à stocker la chaleur dans l'atmosphère et en prenant le carbone comme référence de comparaison.

$$E_{CO2\,é} = M_i \times GWP_i \tag{3.21}$$

3.2. Stratégie d'amélioration de la consommation des ressources à base d'IPO

Suite à l'application du modèle déjà présenté ci-dessus, on peut déterminer certaines stratégies permettant la minimisation des impacts environnementaux issus de la consommation des ressources.
En mettant l'accent sur les matrices de coefficients techniques, on peut essayer de réduire les impacts à l'aide d'un changement étudié au niveau du process de transformation de la matière.

Ainsi, dans le but de suivre le niveau d'utilisation des ressources, on peut définir des ratios comme suit :

- Efficacités d'utilisation de la matière première : $RI - RO/RI$
- Consommation de la matière première : $RI - RO$

Avec :

RI et RO représentent respectivement la quantité de la matière première à l'entré et à la sortie de chaque opération de fabrication du produit.

3.3. Le bilan des émissions

Les émissions au niveau de chaque opération peuvent être :

- Des dégagements gazeux suite à une réaction au niveau du processus utilisé pour la transformation du brut.
- Des dégagements suite à une efficacité inférieure à 100% au niveau de l'utilisation de la matière première ou brute : À ce niveau, plusieurs scénarios possibles : recyclé, réutilisé ou libéré sous forme des déchets.
- Chaleur ou énergie dégagée lors de la transformation de la matière première : elle peut être utilisée ou libérée dans l'environnement.

Suite à ce niveau de modélisation, on prépare le flux des entrées-sorties de chaque opération. Ces données nous permettent par la suite de caractériser les types des déchets ainsi que des matériaux utilisés le long des opérations de fabrication. Cela servira pour la quantification des émissions écologiques en évitant le problème de la double quantification de substances utilisées.

Ainsi, les impacts environnementaux quantifiés ainsi que la fonction économique seront les critères de choix entre les différents procédés possibles pour la fabrication du produit. Ce choix sera illustré par la méthode d'aide à la décision multicritères PROMETHEE I.

4. Choix des outils et description de l'approche globale

Selon l'étude comparative entre les différents algorithmes d'optimisation multi objectif, l'essaim particulaire représente l'une des solutions les plus efficaces dans le contexte d'éco-fabrication. L'agrégation des différents objectifs en une seule fonction avec la possibilité d'une pondération avec certains poids permet la localisation du front de Pareto cherché ou la solution optimale à trouver.

Cette étape de modélisation représente une phase très importante permettant la préparation d'une étude paramétrique où l'écologie et l'économie sont couplées comme deux objectifs à atteindre.

Suite à cette optimisation, la loi entrée/sorties de chaque opération de fabrication est développée. D'où la nécessité d'un inventaire permettant de définir le chemin de chaque entrée de process pour la vérification des sources ainsi que la quantité de l'empreinte écologique.

Cette étape permet la modélisation de la consommation des ressources ainsi que l'influence des process sur chaque entrée. Le résultat se présente sous forme mathématique aidant par la suite à distinguer les différentes possibilités d'amélioration.

Le procédé de fabrication joue un rôle primordial dans la qualité des déchets ainsi que les émissions enregistrées à la fin de chaque opération. C'est dans ce sens que l'aide à la décision est la solution pour le choix final du procédé suite à la préparation d'une base d'étude. Cette dernière regroupe les différents paramètres techniques de chaque opération ainsi qu'un modèle de consommation des ressources. Le choix dans ce cas est la méthode PROMETHEE I, qui est une méthode de sur-classement ayant pour avantage l'étude de l'incomparabilité.

Conclusion

L'intégration de l'aide à la décision avec l'optimisation multi objectifs représente une solution pour faire face au caractère multi critères de l'éco-fabrication. L'approche développée, dans cette partie d'étude, montre une complémentarité entre les deux axes de développement : aide à la décision et optimisation multiobjective.

Ainsi, au niveau de la consommation des ressources, l'IPO représente une solution efficace pour la mise en évidence de l'influence de chaque opération du procédé sur la matière première introduite. Pour l'aspect écologique, cet algorithme permet la résolution de la problématique de la double quantification ainsi que les relations entre les différentes unités d'une chaîne de production.

Pour le caractère multi objectifs, l'essaim particulaire est une solution pour la résolution de ce type des problèmes multi objectifs. Cet algorithme représente une localisation du front de Pareto et qui permet la mise en évidence d'une agrégation facile des différents objectifs.

Suite à l'application de la première approche au niveau de la fabrication de l'acide phosphorique, nous avons constaté que l'unité d'acide sulfurique représente une source importante des émissions néfastes. Nous nous proposons donc, dans le chapitre suivant de déterminer les différents paramètres du procédé pour cette unité qui permettent le respect des objectifs écologiques et économiques en mettant l'accent sur la modélisation des trois piliers : matériaux, énergie et technologie.

Chapitre 4 : Etudes de cas

Introduction

Le respect de l'environnement est l'une des exigences du développement durable permettant le suivi des réglementations ainsi que l'amélioration du secteur industriel.
L'approche proposée dans le chapitre (3) met en évidence la conception d'un processus de fabrication permettant de coupler les objectifs écologiques et économiques pour la préparation du produit étudié.
Cette étude est basée sur l'optimisation multi objectifs ainsi que la modélisation de la consommation des ressources.
Dans ce chapitre, on présente trois études de cas : la première traite le cas d'une opération de tournage. L'objectif est l'adaptation de l'essaim particulaire dans le cadre de l'éco-fabrication. La validation des performances de cet algorithme est validée à l'aide d'une étude comparative avec les algorithmes génétiques.
La deuxième étude de cas traite le cas du fraisage en bout. L'objectif est l'intégration de la qualité de surface comme étant objectif d'étude couplé avec le gain économique et écologique.
Puis, on passe finalement à compléter l'étude d'aide à la décision pour l'usine de fabrication de l'acide phosphorique. Cette dernière souffre d'un taux d'émission élevé au niveau de l'unité de préparation de l'acide sulfurique. D'où notre objectif est la mise en place d'une conception de ce procédé dans le but de minimiser les impacts environnementaux ainsi que l'augmentation du rendement global.

1. Étude de cas 1 : Pièce de tournage

Pour mettre l'accent sur l'adaptation des méthodes d'optimisation multi objectifs à l'aide des essaims particulaires dans le cadre de l'éco-fabrication, on développe une étude de cas sur une opération de chariotage en tournage.

L'objectif de cette partie est la détermination des paramètres de coupe : vitesse de coupe v_c et avance f pour minimiser simultanément : le temps(f_1), le coût de la production (f_2) et la consommation d'énergie(f_3).

Mathématiquement, on peut reformuler le problème étudié comme suit : min F (F=$f_1(v_c, f)$ + $f_2(v_c, f)$ + $f_3(v_c, f)$) sous les contraintes technologiques $g_i = (g_1, g_2, g_3, g_4, g_5) \leq 0$. Les paramètres optimaux cherchés varient comme suit : $0.254 \leq f(\frac{mm}{tr}) \leq 0.762$ et $80 \leq v_c(\frac{m}{mn}) \leq 200$.

1.1. Les fonctions objectives

1.1.1. Temps de Production

Le temps total d'usinage est égal à la somme des temps nécessaires pour usiner la pièce : le temps fixe (étude, réglage), le temps de changement d'outil et le temps technologique de coupe. L'expression générale du temps d'usinage s'exprime par la relation suivante :

$$f_1 = T_u = t_l + t_m + t_r\left(\frac{t_m}{T}\right) \quad (4.1)$$

Avec :

t_l: Temps fixe (étude et réglage).

t_m : Temps technologique de coupe.

t_r : Temps de changement d'outil.

T : Durée de vie de l'outil.

La durée de vie de l'outil de coupe dépend des conditions de coupe. Selon Taylor, on a :

$$T = k^{-\frac{1}{n}} v_c^{\frac{1}{n}} f^{-\frac{p}{n}} a^{-\frac{q}{n}} \quad (4.2)$$

Les valeurs des exposants *n, p, q* de la loi généralisée de Taylor dépendent essentiellement du matériau de l'outil. Le coefficient *K* étant fonction du matériau usiné, de l'outil utilisé et du critère d'usure adopté.

En chariotage, le temps technologique de coupe est donné par l'expression suivante :

$$t_m = \frac{\pi D L}{1000 v_c f} \quad (4.3)$$

Avec : f : L'avance de l'outil en mm par tour.

D : Le diamètre usiné.

L : La longueur usinée.

1.1.2. Coût de Production

Le prix de revient d'une pièce est égal à la somme de tous les frais de fabrication : coût machine, prix de revient d'une arrête de coupe et le coût auxiliaire de lancement de la pièce.

L'expression générale du coût total de la production d'une pièce de tournage est donnée par l'expression suivante :

$$f_2 = P_u = p_0 t_l + p_a + p_0 t_m + p_l \frac{t_m}{T} \quad (4.4)$$

Avec :

p_0 : Coût de la machine.

p_l: Prix de revient d'une arrête de coupe.

p_a: Coût auxiliaire de lancement de la série.

1.1.3. Émission environnementale

La fonction environnement dépend essentiellement de l'énergie, matériau et procédé utilisé pour la mise en forme du produit.

La modélisation de l'énergie consommée en tournage est définie d'après l'expression suivante :

$$f_3 = E = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 \quad (4.5)$$

Avec :

E_1 : Energie de setup.

E_2: Énergie d'enlèvement de matière : Elle est définie par Gutowski comme suit :

$$E_2 = (P_0 + k\dot{v})t_m \quad (4.6)$$

Avec :

P_0: La puissance consommée par les modules de la machine [W].

k: L'énergie spécifique nécessaire pour l'opération [Ws/mm^3].

$\dot{v}$: Le taux d'enlèvement de la matière [mm^3/s].

t_m: Temps de coupe [s].

E_3: Énergie de changement d'outil.

E_4 : Énergie pour produire un outil de coupe normalisée par arête de coupe.

L'énergie consommée pendant le tournage est définie comme suit:

$$E = P_0 t_1 + (P_0 + k\dot{v})t_m + P_0 t_3 \left(\frac{t_m}{T}\right) + Y_E \left(\frac{t_m}{T}\right) \quad (4.7)$$

Avec :

t_1: Temps de setup machine.

t_3: Temps de changement d'outil.

T: Durée de vie de l'outil.

Y_E : Énergie par arrête de coupe.

t_m Est définie comme suit : $t_m = \frac{\pi D_{avg} l}{f v_c}$ avec D_{avg} est déterminé en fonction du diamètre initial et final de la pièce.

L'expression de l'énergie totale devient (Rajemi. MF et al, 2010) :

$$E = P_0 t_1 + P_0 \frac{\pi D_{avg} l}{f v_c} + k \frac{\pi}{4}\left({D_i}^2 - {D_f}^2\right) \frac{f v_c}{\pi D_{avg}} . \frac{\pi D_{avg} l}{f v_c} + P_0 t_3 \left(\frac{\frac{\pi D_{avg} l}{f v_c}}{T}\right) + Y_E \left(\frac{\frac{\pi D_{avg} l}{f v_c}}{T}\right) \quad (4.8)$$

Après simplification de l'équation 4.8, on obtient :

$$f_3 = E = P_0 t_1 + P_0 \frac{\pi D_{avg} l}{f v_c} + k \frac{\pi}{4} \left({D_i}^2 - {D_f}^2 \right) l + P_0 t_3 \left(\frac{\frac{\pi D_{avg} l}{f v_c}}{T} \right) + Y_E \left(\frac{\frac{\pi D_{avg} l}{f v_c}}{T} \right) \quad (4.9)$$

1.2. Les limitations

1.2.1. Limitation de la puissance de coupe

Les conditions de coupe doivent être choisies de manière à ce que la puissance de coupe P_c soit aux plus égales à la puissance maximale disponible P_u sur la broche de la machine- outil. Soit donc : $P_c \leq P_u$

Dans le cas de tournage, la puissance de coupe est donnée par l'expression suivante :

$$P_c = \frac{k_f a f^{0.7} v_c}{60} \quad (4.10)$$

Alors :

$$g_1 = \frac{k_f a f^{0.7} v_c}{60} \leq P_u \quad (4.11)$$

Avec : k_f : Pression spécifique de coupe

1.2.2. Limitation d'effort-couple admissible sur la broche

Le couple appliqué à la broche de la machine ne doit pas dépasser une valeur limite C_{max} qui est indépendante de la vitesse de coupe.

$$g_2 = C = \frac{k_f a f^{0.7} D}{2} \leq C_{max} \quad (4.12)$$

1.2.3. Limitation liée à l'outil

$$0.05 \leq \frac{f}{a} sin{k_r}^2 \leq 0.3 \quad (4.13)$$

$$g_3 = f sin k_r \geq 0.1 \quad (4.14)$$

Avec :

k_r : angle de direction de l'arête de coupe

1.2.4. Limitation liée à la pièce à usiner

Pour une opération de chariotage, on admet généralement que la flèche ne doit pas dépasser une valeur maximaleZ_{max}.

$$g_4 = Z = \frac{k_f a f^{0.7} L^3}{2.4 E D^4} \leq Z_{max} \quad (4.15)$$

La restriction liée à l'état de surface est donnée par la relation exprimant la rugosité totale théorique par rapport à la rugosité réelle maximale à ne pas dépasser.

$$g_5 = R_t = \frac{1000f^2}{8r_\varepsilon} \leq R_{t\,max} \tag{4.16}$$

1.3. Données de simulation

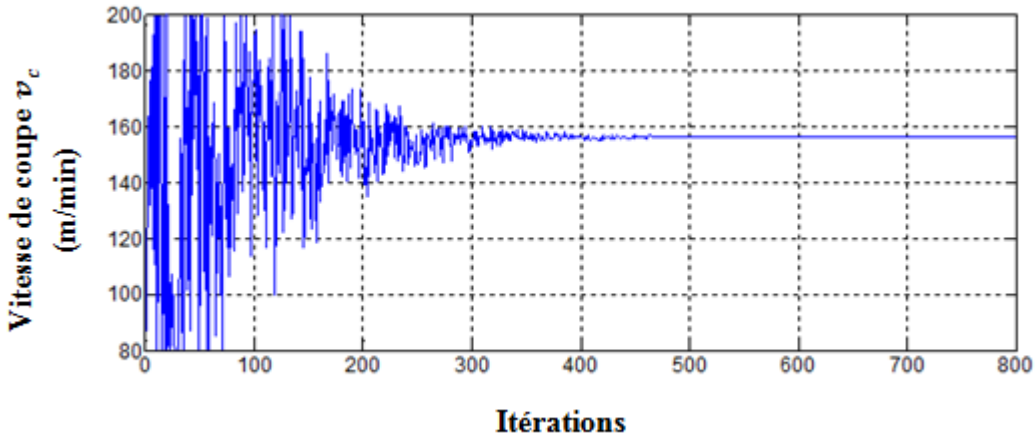
Tableau 4.1. Données de simulation

Paramètres	Symbole	valeur	unité
Temps fixe	t_l	1.5	min
Temps de changement d'outil	t_r	0.5	min
Coût machine	p_0	0.1	Euro/min
Coût d'arrêt	p_l	0.5	Euro/arête
Avance	f	[0.254 0.762]	mm/tr
Coût auxiliaire	p_a	0.1	Euro
Longueur	L	203	mm
Diamètre	D	152	mm
Puissance consommée par machine	P_0	3495	W
Énergie spécifique	k_1	4.3	Ws/mm^3
Exposants de Taylor	n, p, q, k	0.25;0.29;0.35;1 93.3	
Vitesse de coupe	v_c	[80 200]	m/min
Énergie par arête de coupe	Y_E	1325000	J
Profondeur de passe	a	1.5	mm
Rugosité maximale	$R_{t\max}$	2	µm
Puissance maximale	P_u	5000	W

1.4. Résultats

1.4.1. Évaluation des paramètres de coupe

La simulation des essaims pour ce problème d'optimisation a été avec 80 particules et en fixant les paramètres c_1 , c_2 à 0.9 et 0.5 respectivement.



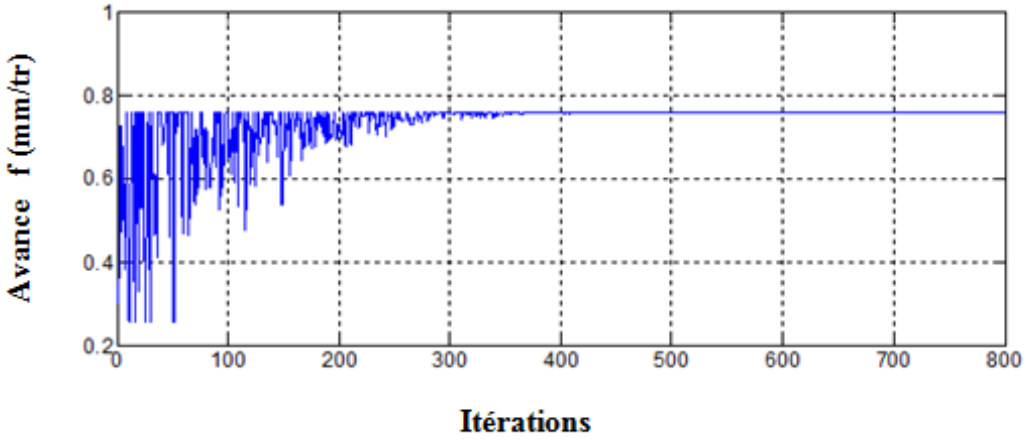


Figure 4.1. *Évolution des paramètres de coupes*

La vitesse de coupe optimale et l'avance sont obtenues à l'itération 400 et on enregistre comme valeurs optimales : $v_c = 156.3318\ m/mn$ et $f = 0.762\ mm/tr$.

1.6.2. Évolution des fonctions objectives

Ces résultats sont les paramètres permettant la minimisation des 3 fonctions objectives considérées, qui sont : le temps, le coût et l'énergie consommée. L'évolution de ces fonctions le long de la simulation est représentée à l'aide des figures suivantes (4.2, 4.3, 4.4):

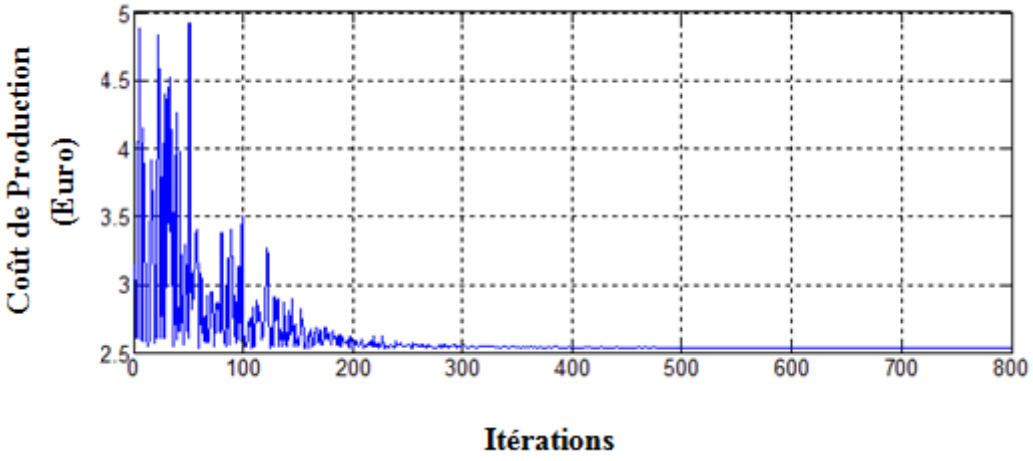


Figure 4.2. *Optimisation du coût de production*

La figure 4.2 montre l'évolution du coût de la production le long de la simulation de l'algorithme. Le coût optimal est de l'ordre de 2.5378 *euros* obtenu à l'itération 400.

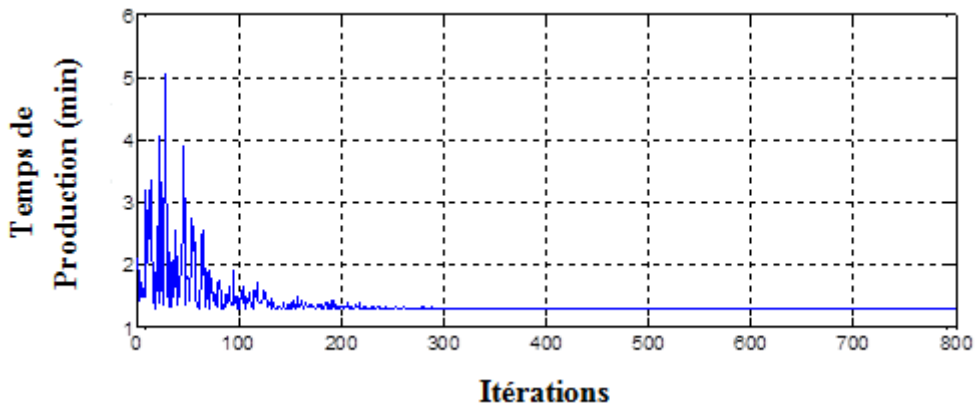


Figure 4.3. *Optimisation du temps de production*

Le temps optimal est de l'ordre de 1.2878 *min* comme l'illustre la figure 4.3.

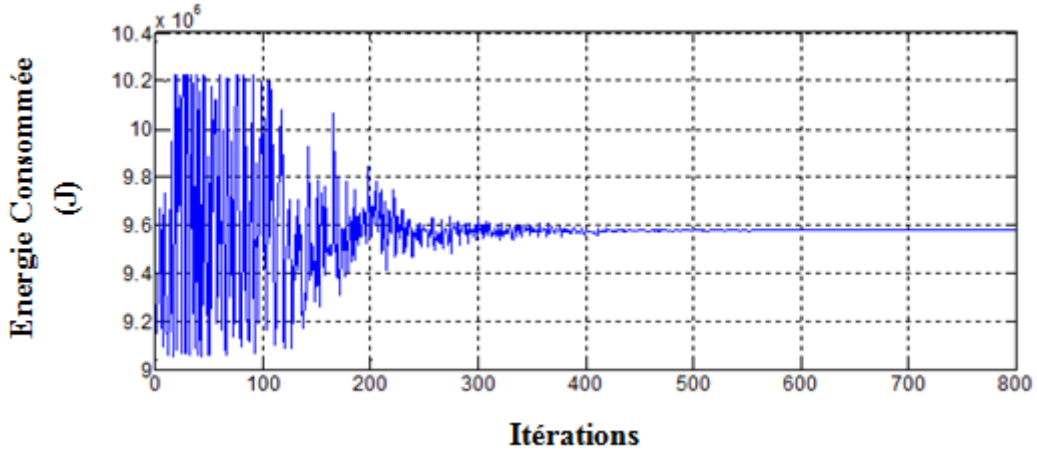


Figure 4.4. *Évolution de la consommation d'énergie*

Pour la mise en place d'une démarche d'éco-fabrication, l'aspect écologique dans cette application a été implémenté sur la forme d'une fonction énergétique. Cette dernière englobe l'énergie directe, l'énergie indirecte et l'énergie auxiliaire.
À l'aide du modèle décrit, l'énergie optimale consommée est de l'ordre de 9.5775 10^6 J (figure 4.4).

1.6.3. Influence de la profondeur de passe

Dans la pratique, la profondeur de passe représente un paramètre de coupe important qui influence la qualité de résultat obtenu dans l'optimisation. Dans le tableau (4.2), on présente les résultats de la modélisation pour différentes valeurs de la profondeur de passe.

Tableau 4.2. Résultats de simulation pour différentes profondeurs de passe

a (mm)	0.5	1.5	2.5	4	5
f_1	1.0024	1.2878	1.4934	1.7845	1.989
f_2	2.2524	2.5378	2.7434	3.0345	3.239

f_3	9.2187 10^6	9.5775 10^6	9.9601 10^6	1.0619 10^7	1.1126 10^7
v_c	191.6458	156.3318	145.3907	138.6490	136.7244
f	0.762	0.762	0.762	0.762	0.762

En fonction de la profondeur de passe, la variation du temps et du coût de la production est importante. Mais la consommation d'énergie a légèrement varié. Nous pouvons conclure ici que le respect de l'aspect environnemental est à l'origine d'une dépense économique importante.

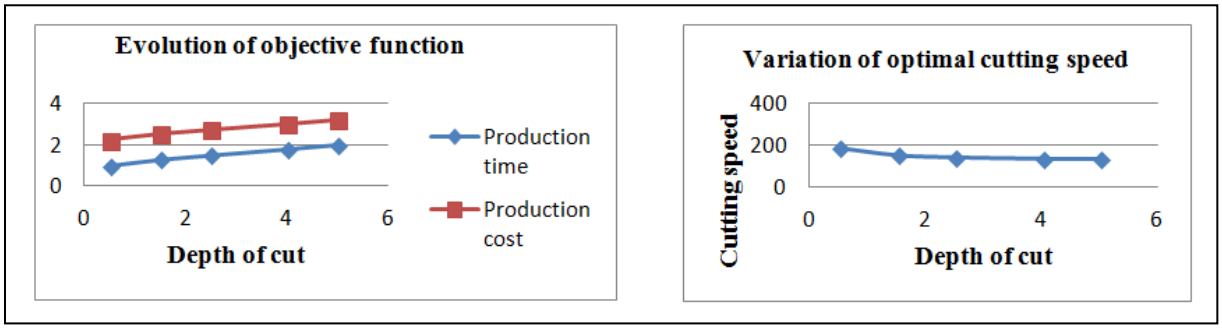


Figure 4.5. *Influence de la profondeur de passe*

On constate la diminution de la vitesse de coupe en augmentant la profondeur de coupe. Mais le coût, le temps et l'énergie augmentent avec l'augmentation de ce paramètre de coupe. Le coût de la production dans ce cas ne comprend que les coûts de l'opération, mais l'usinage durable dépend aussi du matériau utilisé. C'est dans ce sens que le matériau utilisé, le lubrifiant ainsi que les matériaux auxiliaires peuvent être ajoutés à la fonction objective.
La figure 4.5 montre la diminution de la vitesse de coupe avec l'augmentation de la profondeur de passe afin d'atteindre la diminution du coût, du temps et de la consommation d'énergie. D'après ces résultats, on peut déterminer la vitesse de coupe optimale pour une certaine valeur de la profondeur de passe.
Cette approche pour l'optimisation des paramètres de coupe peut être développée pour les différentes étapes du cycle de vie du produit pour obtenir la «fabrication à faible teneur en carbone». Cette expression a été inventée pour refléter un effort global visant la réduction des émissions de CO_2 généré par l'énergie consommée directement par les activités de fabrication.
L'application de l'optimisation par essaim particulaire pour l'éco-fabrication permet de définir une idée pour coupler les objectifs économiques et écologiques. Mais, pour appliquer ce type d'approche dans les opérations d'usinage, nous avons besoin d'une étude précise des différents paramètres du procédé étudié.

1.6.4. Comparaison avec les algorithmes génétiques

Pour mettre en évidence l'efficacité de la méthode utilisée, on a fait recours à une validation en utilisant les algorithmes génétiques. Le modèle NSGA II a été l'algorithme implémenté dans cette étape de validation.

Tableau 4.3. Résultats de simulation avec EP et AG

a (mm)	2		3		4	
	OEP	AG	OEP	AG	OEP	AG
f_1	1.35406	1.3941	1.580291	1.5901	1.578282	1.7845
f_2	2.73798	2.6441	2.91447	2.8401	2.945783	3.0345
f_3	$9.34\ 10^6$	$9.7641\ 10^6$	$9.1112\ 10^6$	$1.0167\ 10^7$	$9.32\ 10^6$	$1.0619\ 10^7$
v_c	95.3953	148.7312	80	142.3732	81.04717	138.649
f	0.762	0.762	0.762	0.762	0.762	0.762

Le tableau 4.3 montre une étude comparative pour l'optimisation multi objectifs en utilisant deux différentes méthodologies : l'optimisation par essaim particulaire et les algorithmes génétiques. Ces derniers permettent l'identification d'un front de Pareto résumant les différentes solutions possibles du problème étudié.
Lors de la simulation de NSGA II, on a adopté 200 générations chacune avec 200 populations. On remarque que les résultats sont en accord avec ceux obtenus par OEP ce qui nous renseigne sur l'efficacité de cette dernière.

2. Étude de cas en fraisage

On s'intéresse dans cette étape à l'étude d'une opération de fraisage en bout. L'axe de la fraise est placé perpendiculairement à la surface à usiner. La fraise coupe avec son profil, mais aussi avec sa partie frontale. Les copeaux sont de même épaisseur, ainsi la charge de la machine est plus régulière.
La capacité de coupe est supérieure à celle réalisée par le fraisage en roulant. La qualité de l'état de surface obtenue est meilleure pour ce type de procédé.
Dans ce cas, on désire coupler 4 objectifs : le temps, le coût, l'empreinte écologique et la qualité de surface. Ces objectifs sont liés aussi aux contraintes technologiques.
À partir de l'étude de cas 1, on a constaté l'efficacité et la précision des résultats des essaims particulaires. On désire déterminer les paramètres de coupes optimaux en intégrant la qualité du produit comme étant objectif à atteindre.

Pour l'optimisation, on cherche à déterminer a, v_c et f_z pour Min (f_1, f_2, f_3, f_4) sous les contraintes $g_i \leq 0$ avec $1 \leq i \leq 4$.
Les bornes des paramètres de coupes sont :

$$50 \leq v_c \leq 400$$

$$0.1 \leq f_z \leq 0.6$$

$$0.5 \leq a \leq 5$$

2.1. Détermination des fonctions objectives

2.1.1. Le temps de la production

Le temps d'usinage unitaire est le temps nécessaire à la réalisation d'une passe sur une pièce . Il s'exprime par la relation :

$$f_1 = t_c + t_a + \left(\frac{t_c}{T}\right) t_{vb} \tag{4.17}$$

f_1: Le temps de la production d'une pièce.
t_c: Le temps de coupe (temps outil).
t_a: Le temps auxiliaire (montage et démontage de la pièce, prise de passes).
T: Durée de vie de l'outil de coupe.
t_{vb}: Le temps de changement d'outil.

Pour le fraisage en bout, le temps de coupe est défini comme suit :

$$t_c = \frac{(D + L + l_1 + l_2)}{1000 f_z z V_c} \tag{4.18}$$

Avec : L : Longueur de la fraise.
l_1: Longueur d'approche.
l_2: Longueur de dégagement.

Selon la loi de Taylor, la durée de vie de l'outil de coupe T est donnée à l'aide de l'expression suivante :

$$T = k^{\frac{1}{a_3}} V_c^{\frac{1}{a_3}} f_z^{\frac{a_1}{a_3}} a^{\frac{a_2}{a_3}} \tag{4.19}$$

Avec :

a_1, a_2, a_3 : Exposants dépendants da la nuance de l'outil.

k : Constante dépendant du matériau à usiner.

2.1.2. Le coût de la production

Le coût de production est la somme des coûts suivants : coût machine, coût outil et frais fixe. D'où l'expression suivante :

$$f_2 = C_t = C_0 t_a + C_0 t_c + C_l \frac{t_c}{T} + C_a \tag{4.20}$$

$Avec$:

C_0 : Coût machine.
C_l : Prix de revient d'une arrête de coupe.
C_a : Coût auxiliaire de lancement de la série ramené à une pièce.
t_a : Temps auxiliaire.
T : Durée de vie de l'outil de coupe.

2.1.3. L'empreinte écologique

La fonction écologique est définie dans ce cas d'étude par une fonction monocritère qui est l'équivalent carbone. L'expression de cette fonction est la suivante :

$$f_3 = \alpha_e p_c t_c \tag{4.21}$$

Où :

p_c : La puissance consommée.

α_e : Le facteur d'émission liée à la source d'énergie utilisée.

2.1.4. La qualité de la surface

On appelle états de surface les irrégularités de la surface (ondulation et rugosité) dues au procédé d'élaboration de la pièce (usinage, moulage, etc.). Ils sont le plus souvent, mesurés avec des appareils a palpeur a point de diamant appelé profilométres, qui relèvent le profil de la surface.
On adopte la rugosité comme objectif qui englobe la qualité de la surface. L'expression de la fonction objective est la suivante :

$$f_4 = k{v_c}^{x_1}{f_z}^{x_2}a^{x_3} \tag{4.22}$$

Avec : x_1, x_2, $x_3$et k : Des constantes dépendant du matériau usiné et de l'outil de coupe.

2.2. Les contraintes de production

L'optimisation de la fonction objective nécessite souvent des limitations pratiques des conditions de coupe (puissance de coupe, gammes des vitesses et des avances, résistance de l'outil, etc..). Les limitations additionnelles sont nécessaires pour la stabilité du processus de coupe et le respect de la qualité de la pièce à usiner.

2.2.1. Limitation liée à l'effort de coupe

Les difficultés que l'on éprouve à interpréter correctement les actions de coupe en fraisage conduisent à envisager, pour le calcul des efforts et des puissances, l'hypothèse dite de Hull : On placera l'outil dans les conditions de coupe suivantes : une seule arête de coupe, enlevant une section droite de matière uniquement par avance de l'outil à la vitesse et sans rotation.
La force de coupe est calculée par la formule suivante :

$$F_c = \frac{k_s a p f_z Z}{\pi D} \tag{4.23}$$

Avec :

k_s : Pression spécifique de coupe en $N/_{mm^2}$

Alors :

$$g_1 = \frac{k_s a p f_z Z}{\pi D} \leq F_{max} \tag{4.24}$$

2.2.2. Limitation liée à la puissance de coupe

La puissance nécessaire à la coupe peut être définie comme suit :

$$P_c = \frac{F_c V_c}{60000} \tag{4.25}$$

Elle doit être inférieure ou égale à la pression de coupe maximale : $p_{max} = p_m \mu$

Alors :

$$g_2 = \frac{k_s a p f_z Z V_c}{60000 \pi D \mu} \leq p_m \tag{4.26}$$

2.2.3. Limitation liée à la résistance pratique à la rupture

La condition de résistance à la rupture d'une fraise est : $\tau_{max} \leq [\tau]$

Le moment le plus important dans le fraisage est le moment de torsion M_z avec :

$$\tau_{max} = \frac{16 M_z}{\pi D^3} \tag{4.27}$$

Alors:

$$g_3 = \frac{8\, k_s a p f_z Z}{\pi^2 D^3} \leq [\tau] \tag{4.28}$$

2.2.4. Limitation sur la résistance à la déformation de l'outil de coupe

La condition de résistance à la déformation d'une fraise est :

$$\theta_{max} \leq [\theta] \tag{4.29}$$

$[\theta]$: L'angle de rotation relative admissible

$$\theta_{max} = \frac{32 M_z l}{G \pi D^4} \tag{4.30}$$

Avec :

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \tag{4.31}$$

l: Longueur de la fraise.

G : Module d'élasticité.

μ: Le coefficient de poisson.

E : Module d'Young.

Alors :

$$g_4 = \frac{32(1+\mu) k_s a p f_z Z}{E \pi^2 D^4} \leq [\theta] \tag{4.32}$$

2.3. Données de simulation

Tableau 4.4. Données de simulation

Paramètres	Symbole	Valeur	Unité
Coût machine	C_0	0.5	Euro/min
Coût de production par arrête	C_l	2.5	Euro/min
Temps de changement d'outil	t_{vb}	1.5	min
Temps auxiliaire	t_a	1.918	min
Longueur	L	240	mm
Largeur	b	100	mm
Longueur d'approche	l_1	1	mm
Longueur de dégagement	l_2	1	mm
Diamètre de l'outil	D	160	mm
Nombre de dents	z	16	-
Durée de vie de l'outil	T	-	-
Force maximale	F_{max}	8000	N
Puissance maximale	P_{max}	8	Kw
Efficacité machine	μ	0.75	-

Paramètres de la rugosité	k, x_1,x_2,x_3	1.001,0.0088,0.3232,0.3144	-
Pression spécifique de coupe	k_s	**2000**	N/mm^2
Résistance à la rupture	τ	**1200**	N/mm^2

2.4. Résultats et discussion

2.4.1. Évaluation des paramètres de coupe

Avec un essaim de 100 particules et des coefficients$c_1 = 0.9\ et\ c_2 = 0.5$, on cherche à résoudre le problème d'optimisation décrit ci-dessus. Au niveau des paramètres de coupe, la solution optimale est : $a = 4\ mm, v_c = 60.4154\frac{mm}{min} et\ f_z = 0.6mm/dent$.

La figure 4.6 montre l'évolution de la profondeur de passe durant la simulation. La profondeur de passe optimale est de l'ordre de 4 mm. Cette valeur couplée avec les deux autres paramètres de coupes (f etv_c) améliore la qualité de surface à l'aide du la fonction ''rugosité''. Cette dernière vérifie les conditions expérimentales pour ce type d'usinage

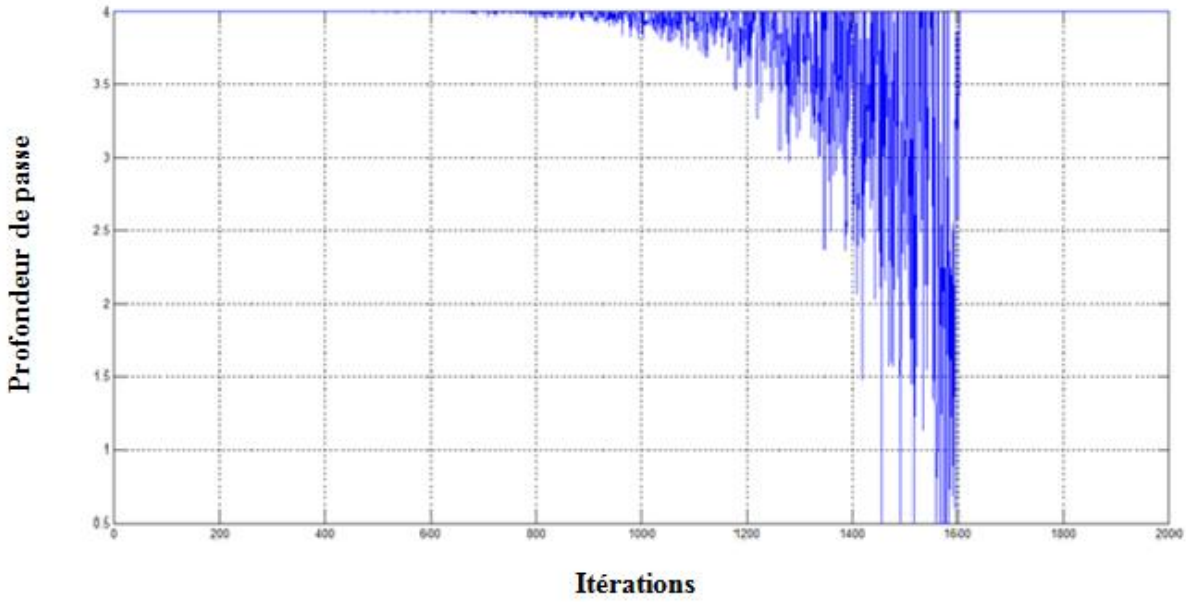


Figure 4.6. *Évolution de la profondeur de passe*

.

2.4.2. Évolution des objectives de l'optimisation

Les objectifs à atteindre suite à la procédure d'optimisation sont : le temps de production, le coût de production, l'empreinte carbone et la rugosité.
Ces objectifs tendent à coupler les objectifs écologiques, économiques et la qualité de surface obtenue.
La figure 4.7 montre un coût optimal de l'ordre de 1.0997 euro. Ce coût sera en accord avec une minimisation du temps de la production qui est de l'ordre 2.1981 min (figure 4.9). Ces deux objectifs économiques favorisent les notions de l'éco-fabrication en assurant un coût modéré d'usinage de la pièce et en améliorant simultanément l'empreinte écologique et la rugosité.

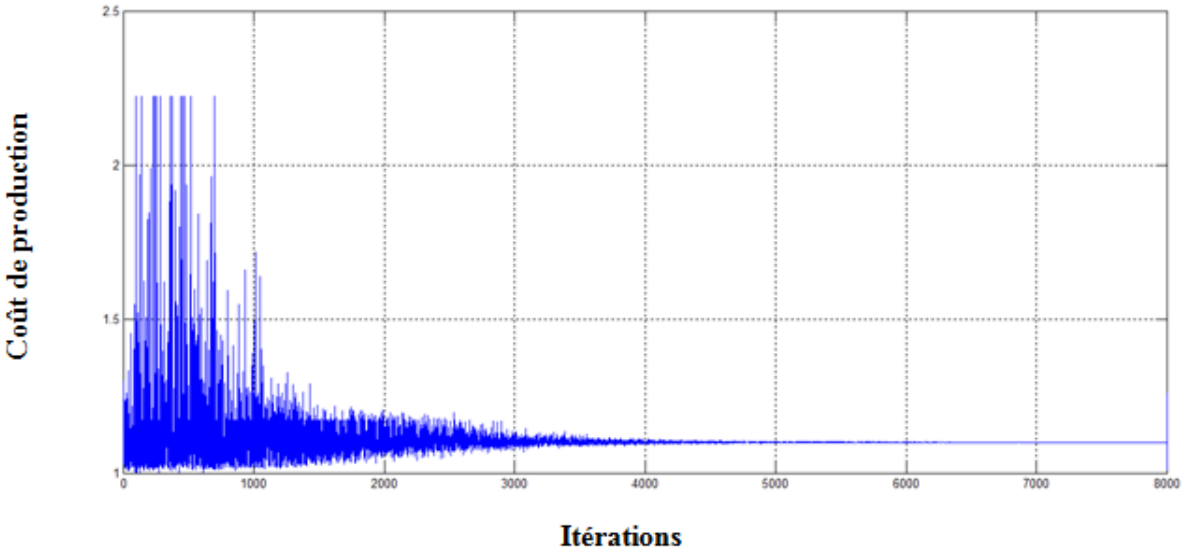


Figure 4.7. *Évolution du coût de la production*

Cette opération de fraisage en bout est responsable d'une émission environnementale de l'ordre de 0.0226 $équ\ CO_2$ (figure 4.8). Cette quantité traite les substances utilisées lors de l'enlèvement de la matière.

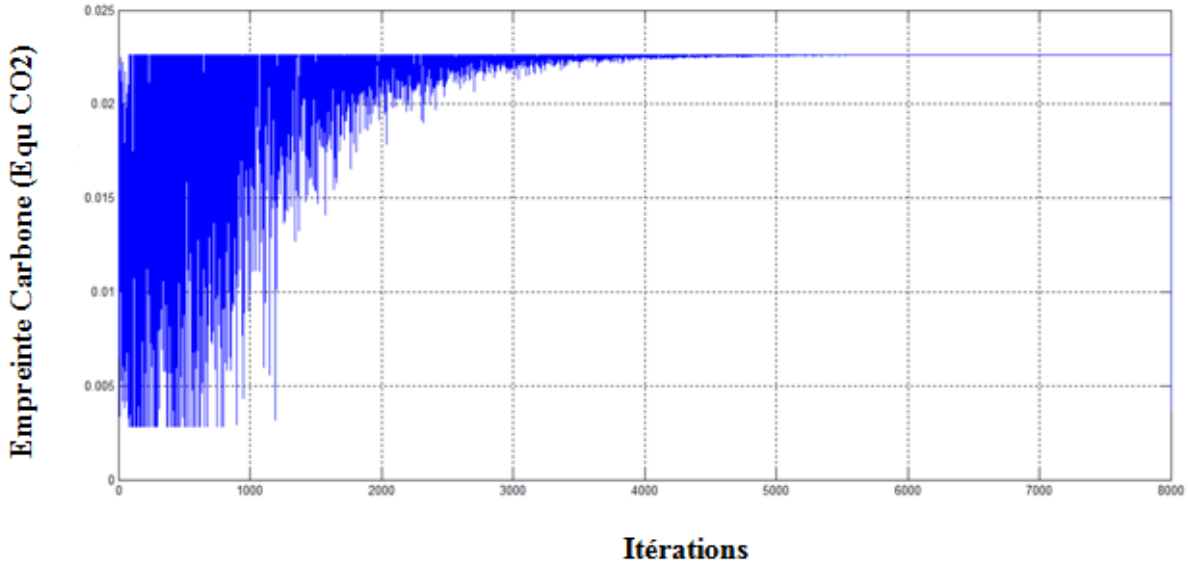


Figure 4.8. *Évolution de l'empreinte carbone*

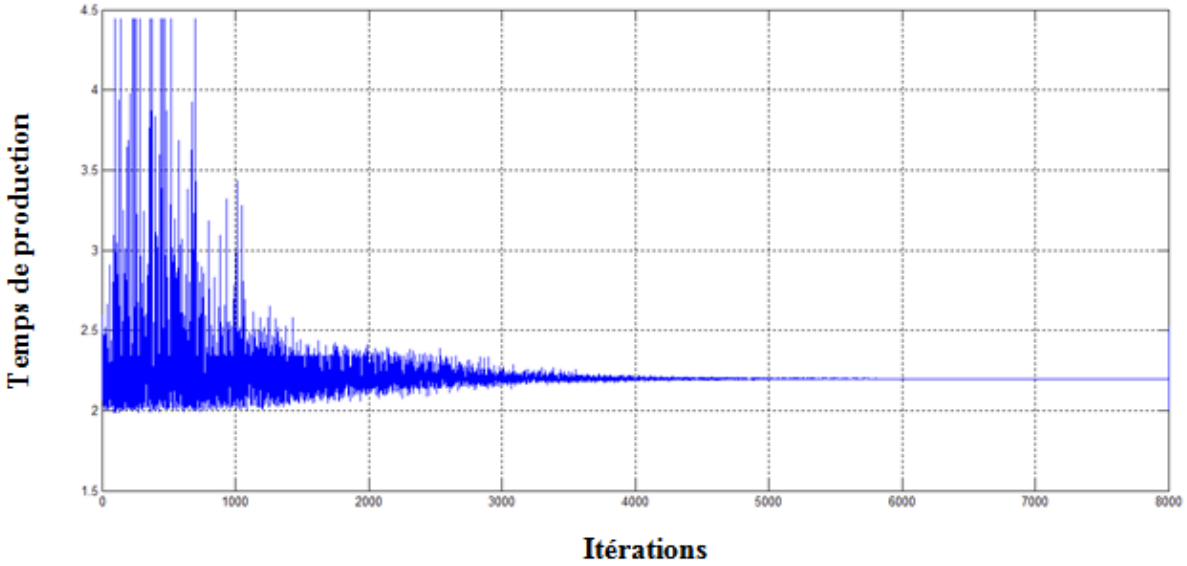


Figure 4.9. *Évolution du temps de la production*

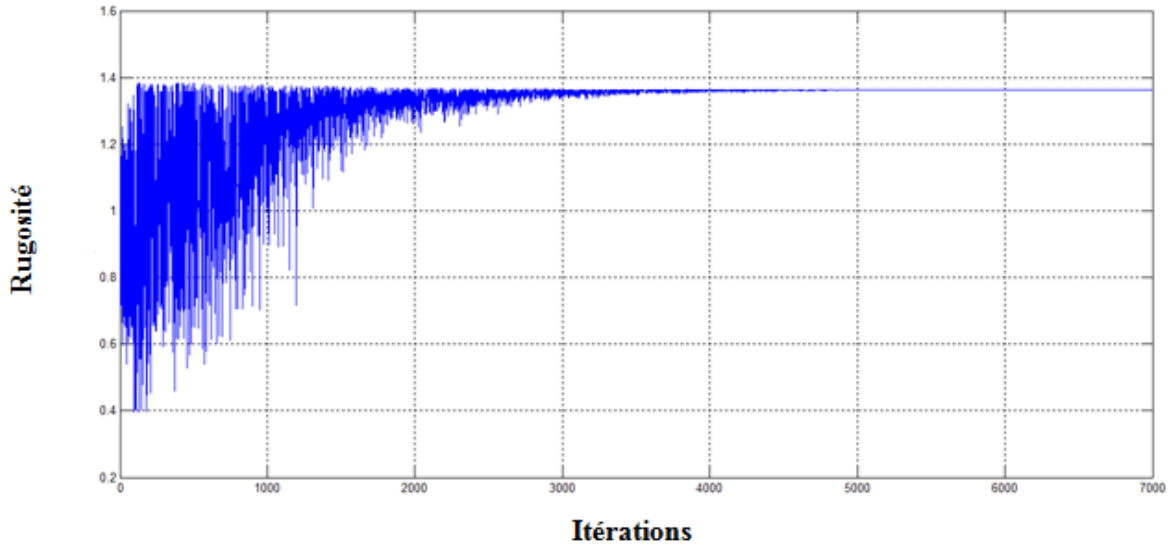


Figure 4.10. *Évolution de la rugosité*

Les résultats, définis à travers les figures précédentes (4.7 à 4.10), montrent l'importance de la profondeur de passe en tant que paramètre de coupe. L'optimisation de ce dernier paramètre permet l'amélioration de la qualité de surface obtenue ainsi que la diminution de l'empreinte carbone comparée avec les travaux récents au niveau du fraisage en bout.
Suite à cet exemple d'étude, nous avons préparé un modèle global du fraisage en bout permettant le couplage entre les objectifs économiques, écologiques et la qualité du produit étudié. Ainsi, nous avons adopté un modèle réduit des émissions écologiques résumant l'impact des substances utilisées. Ce modèle sera traité dans le cadre de notre dernier cas d'étude où nous allons intégrer les paramètres des procédés dans le modèle écologique pour assurer l'intégration du pilier technologique dans la modélisation pour l'éco-fabrication.

3. Étude de cas : unité de production de l'acide sulfurique

Suite à l'application de l'approche process (Chapitre 2), nous avons constaté que le comportement écologique de l'industrie de la fabrication de l'acide phosphorique se trouve influé par l'unité de fabrication de l'acide sulfurique. Cette dernière représente 55.7% de la totalité des émissions de la société.

Dans l'objectif de maîtriser les émissions écologiques de cette unité, nous appliquons l'approche produit pour l'étude de la phase de fabrication de l'acide sulfurique. Notre objectif est la détermination et la modélisation des paramètres optimaux du procédé permettant la fabrication du produit étudié en minimisant les émissions environnementales.

3.1. Présentation de l'unité d'acide sulfurique

La préparation de l'acide sulfurique passe par trois étapes : la combustion, la conversion et l'absorption. Pour la préparation de ce produit, l'installation est constituée essentiellement

de : un four de combustion, une chaudière de récupération, un convertisseur et un tour d'absorption. La figure 4.11 montre la disposition de ces éléments :

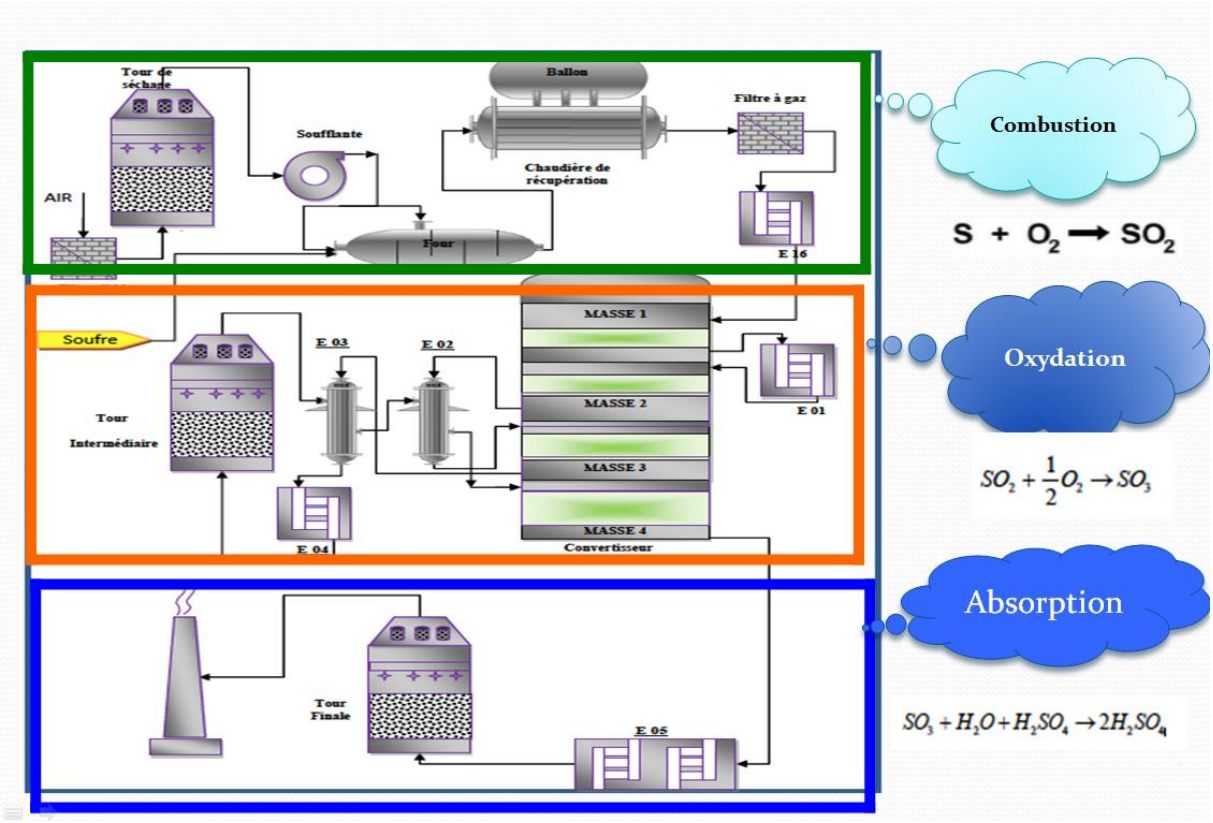


Figure 4.11. *Unité d'acide sulfurique*

La production d'acide sulfurique comporte trois réactions chimiques à caractère exothermique.

- 1re réaction :

  Combustion: $S + O_2 \rightarrow SO_2$ +70,94Kcal/mol de H_2SO_4

- 2e réaction :

  Conversion : $SO_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow SO_3$ +23,45Kcal/mol de H_2SO_4

- 3e réaction :

  Absorption : $SO_3 + H_2O \rightarrow H_2SO_4$ +32,8Kcal/mol de H_2SO_4

- Réaction globale :

$S + \frac{3}{2}O_2 + H_2O \rightarrow H_2SO_4$ 127,19Kcal/mol de H_2SO_4

La modélisation de l'installation par produit dépend essentiellement des contraintes techniques ainsi que des objectifs à atteindre. Pour la mise en place de l'éco-fabrication, on se propose de coupler les objectifs économiques (coût…) et écologiques en tenant compte des contraintes techniques.

3.2. Modélisation de la phase de combustion

Réaction de combustion : $S + O_2 \rightarrow SO_2$ +70,94Kcal/mol de H_2SO_4

L'exothermicité de la réaction correspond à un pouvoir calorifique (PC) du soufre liquide :

$$PC = \frac{70{,}94 \times 1000}{32} = 2217 Kcal / Kg\ de\ soufre = 9280.362 Kj / Kg\ de\ soufre$$

La combustion du soufre se fait en présence de l'air (21 % O_2+79 %N_2).

Combustion neutre :

$$21\ S + 21\ O_2 + 79\ N2 \rightarrow 21\ SO_2 + 79\ O2$$

La teneur du gaz à la sortie du four est de 21% deSO_2. Ainsi qu'il sera présenté ultérieurement le gaz de combustion à la sortie du four devra avoir une teneur en SO_2de 12 %. Et pour avoir cette composition, il est nécessaire de brûler le soufre avec un excès d'air (X<21) :

$$X\,S + 21\,O2 + 79\,N2 \Rightarrow X\,SO2 + (21-X)\,O2 + 79\,N2$$

Cette façon d'écrire la réaction permet d'obtenir directement dans le second membre une somme de molécules égale à 100 :

X :% SO_2 dans le gaz et la somme (SO_2 +O_2) =21, et d'une manière générale : $\text{Excès d'air} = \frac{21-X}{X}\%$

3.2.1. Chaleur dégagée Q

Le bilan de four de combustion peut être défini comme suit :

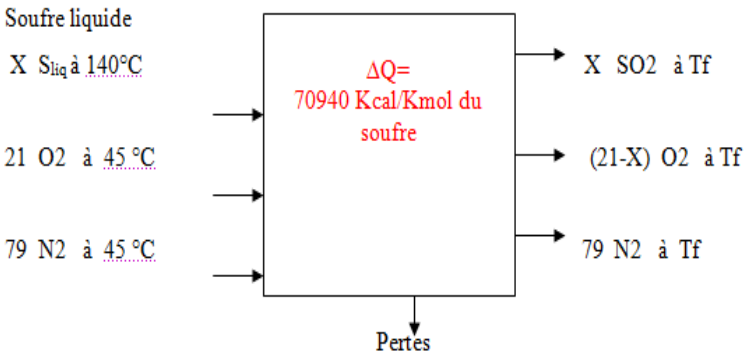


Figure 4.12. *Four de combustion du soufre liquide*

La chaleur libérée par la combustion de X kmoles de soufre est définie comme suit :

$$\Delta Q_f = 70940 * X \text{ Kcal/kmole}$$
$$= 296954,84 * X \text{ Kj/kmole}$$

La chaleur fournie du gaz dans la chambre de combustion, avec estimation des pertes est :

$$\Delta Q_f = 296954,84 * (1 - \text{pertes}) * X$$

3.2.2. Températures des gaz à l'entrée et à la sortie du four

La température des gaz à la sortie de la chambre de combustion est fonction de la valeur de l'excès d'air qui, elle-même, conditionne la teneur en SO_2.
Une augmentation du débit d'air provoque :
- Une baisse de température des gaz.
- Une diminution de la teneur en SO_2dans ces gaz.

La température des gaz peut être calculée en écrivant le bilan sur le four de combustion. On prendra comme référence la température ambiante 25°C.
On suppose que les pertes thermiques sur le four sont nulles.

- **Bilan enthalpique sur le four de combustion**:

Enthalpie à l'entrée - enthalpie à la sortie = pertes

$$H_{Four}^{E} - H_{Four}^{S} - Pertes = 0$$
$$H_{Four}^{E} - H_{Four}^{S} * (1 - Pertes) = 0$$

- **Données thermiques :**

Enthalpie des gaz $h_T^{\circ} - h_{298.15}^{\circ}$ (kJ/mol):

$$SO2 = 0,05161 * T - 314,3$$
$$O2 = 0,03333 * T - 10,79$$
$$N2 = 0,0311 * T - 9,797$$

3.2.3. Bilan enthalpique à l'entrée du four :

Tableau 4.5. Bilan enthalpique à l'entrée du four

	Moles	T (°C)	H_E (kJ/mole)	H_E (kJ/mole)*n_G
S	X	140	0,0235*(140)-0,5873	2,7027*X*1000
O_2	21	45	0,03333*(45)-10,79	-195,093*1000

N_2	79	45	0,0311*(45)-9,797	-663,4025*1000
TÔT	100+X		(2,7027*X-858,4955)*1000	

3.2.4. Bilan enthalpique à la sortie du four :

Tableau 4.6. Bilan enthalpique à la sortie du four

	Moles	h_{25} (kJ/mole)	h_s= h_{25}*mole
S	X	0.05161*T_f-314.3	[0.05161*T_f-314.3]*X
O_2	21-X	0,03333*T_f-10,79	[0,03333*T_f-10,79]*(21-X)
N_2	79	0,0311*T_f-9,797	2.633*T_f-773.963
TÔT	100	((0.01828*X+3.15683)* T_f-303.51*X-1000.553)*1000	

3.2.5. Bilan enthalpique global

L'enthalpie des gaz à la sortie du four en fonction de X et T_f est donnée comme suit: $H^S_{Four} = ((0{,}01828 * X + 3{,}15683) * T_f - 303{,}51 * X - 1000{,}553) * 1000$

Or on a:

$$H^S_{Four} * (1 - \text{Pertes}) - H^E_{Four} = 0$$

Les pertes thermiques sur le four sont supposées nulles d'où :

$$((0{,}01828 * X + 3{,}15683) * T_f - 303{,}51 * X - 1000{,}553) * 1000 - (2{,}7027 * X - 858{,}4955) * 1000 = 0$$
$$(0{,}01828 * X + 3{,}15683) * T_f - 303{,}51 * X - 1000{,}553 - (2{,}7027 * X - 858{,}4955) = 0$$

On obtient ainsi une équation rationnelle en T_f contenant le paramètre X qui correspond à la teneur du SO_2dans le gaz de combustion.
On cherche T_f pour une teneur X en SO_2variant de 8 à 21 % qui correspond à un excès d'air défini comme suit:

$$\frac{O_2 excès}{O_2 Combiné} = \frac{21-8}{8} * 100 = 162{,}5\% \text{ à } \frac{21-21}{21} * 100 = 0\% .$$

3.2.6. Fonction économique pour l'exploitation du four de combustion

La fonction objective utilisée comme critère économique dans ce cas résume le coût d'investissement des équipements thermique. Pour les fours de combustion ou chaudière de récupération, cette fonction peut être reformulée comme suit :

$$\frac{25.6\,\dot{m}_a}{(0.995-\frac{P_2}{P_1})}\left(1+Exp\left(0.018\,T_f-26.4\right)\right) \tag{4.33}$$

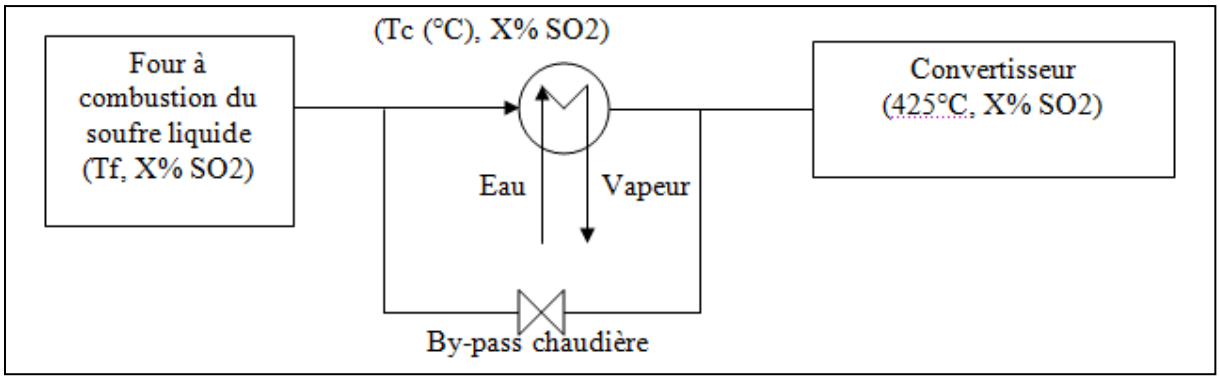
Avec :

- $\dot{m}_a$: débit d'air (kg/s)
- P_1, P_2 : Pression en amont et en aval (bar)
- T_f : température de la chambre de combustion (k)

3.3. Modélisation de la chaudière de récupération

L'équipement installé entre le convertisseur et le four de la combustion du soufre liquide est la chaudière. Elle permet l'abaissement de la température du gaz de T_f(°C) à Tc (°C) en produisant de la vapeur. Pour une marche normale de l'atelier sulfurique, on peut choisir comme donnée de calcul :

- Sortie four X % SO_2et T_f°C
- Entrée convertisseur X % SO_2et 425°C



3.3.1. Bilan enthalpique

Soit H^{E}_{Conv} : l'enthalpie des gaz à 10,85 % SO_2et à 425°C à l'entrée du convertisseur (sortie chaudière après mélange).

NB : on prendra comme base de calcul 100Kmol du gaz à l'entrée de convertisseur. Les pertes sont supposées nulles dans tout le rapport.

Tableau 4.7. Enthalpie des gaz à l'entrée du premier lit

	Moles	h25 (kJ/mol)	H_{conv} (kJ/mol)
SO_2	10,85	0,05161*T-314,3	-3 172 168,388
O_2	10,15	0,03333*T-10,79	34 258,7875
N_2	79	0,0311*T-9,797	270 219,5
TÔT	100		-2 867 690,1kJ

- L'enthalpie sortie four à 10,85% SO_2et à 1032°C est :

$$H^{S}_{Four} = -831\ 103{,}124\ \text{Kj}$$

- La chaleur fournie à la chaudière est :

$$\Delta Q_{Chaud} = H^{S}_{Four} - H^{E}_{Conv} = -831\ 103{,}124 - (-2\ 867\ 690{,}1) = 2\ 036\ 586{,}976\ Kj\ pour\ 10{,}85 * 32 = 347{,}2\ Kg\ du\ soufre\ brûlé$$

- La puissance de la chaudière est :

$$\Delta q_{Chaud} = \frac{2\ 036\ 586{,}976}{347{,}2} = 5865{,}746\ Kj/Kg\ du\ soufre\ brûlé$$

Pour une production de 1500 T/j d'acide sulfurique, on doit brûler :

$$\frac{1500 * 32}{98 * 0{,}985 * 0{,}997} = 498{,}75\ T\ du\ soufre\ /\ jour$$

Ce qui correspond à une récupération de chaleur sur le gaz entre 1032 et 425 °C:

$$\Delta Q_{Chaud} = 498{,}75 * 5865{,}746 * 1000 = 2\ 925\ 540\ 818\ \text{Kj}/j = 121\ 897\ 534{,}1\ \text{Kj}/h = 29\ 120\ 290\ Kcal\ /\ h$$

3.3.2. Fonction Economique

On exprime le critère économique dans ce cas de chaudière par l'expression suivante :

$$3650\left(\frac{h_s}{\frac{\ln(T_f - T_c)}{\ln(10)}}\right)^{0.8} + 11820 m_s + 658(\dot{m}_g)^{0.5} \qquad (4.34)$$

Avec :

- $\dot{m}_g$: débit de gaz (kg/s)
- m_s : débit de vapeur (kg/s)

- h_s : enthalpie fournie à la vapeur (kW)
- T_f, T_c : température en aval et en amont (k)

3.4. Modélisation de la phase de conversion

L'oxydation du SO_2 en SO_3 s'effectue selon la réaction suivante :

$$SO2 + ½ O2 \leftrightarrow SO3 + 23450 \text{ Kcal/kmole de } SO3$$

C'est une réaction fortement exothermique et équilibrée qui se réalise sur un catalyseur solide à l'oxyde de vanadium V_2O_5 et dont la température de démarrage se situe un peu au-dessus de 400°C. La réaction étant équilibrée, le taux de conversion, exprimé en %, détermine le rapport du nombre des molécules de SO_3formées au nombre des molécules de SO_2présentes dans le gaz d'alimentation du convertisseur.

Comme équipement, un convertisseur à 4 lits de conversion est utilisé. Ainsi, pour assurer l'équilibre thermodynamique de l'installation, on installe les équipements auxiliaires permettant la mise en place d'un système à double absorption. Ces équipements sont : un surchauffeur, deux échangeurs, un économiseur et tour d'absorption intermédiaire.

3.4.1. 1er Lit de conversion :

Le mélange sortant de la chaudière de récupération passe au premier lit de conversion à la température de sortie. Les enthalpies des gaz sont :

$$H_{SO2} = 0{,}05161 * T - 314{,}3$$
$$H_{O2} = 0{,}03333 * T - 10{,}79$$
$$H_{N2} = 0{,}0311 * T - 9{,}797$$
$$H_{SO3} = 0{,}07144 * T - 420{,}6$$

La modélisation de cette phase passe par le bilan matière et le bilan enthalpique :

- **Bilan élémentaire sur le soufre S:**

$$1 * n_{SO2}^{E} = 1 * n_{SO3}^{S} + 1 * n_{SO2}^{S}$$

$$1 * n_{SO3}^{S} + 1 * n_{SO2}^{S} - 1 * n_{SO2}^{E} = 0$$

- **Bilan élémentaire sur l'oxygène O :**

$$2 * n_{SO2}^{E} + 2 * n_{O2}^{E} = 3 * n_{SO3}^{S} + 2 * n_{SO2}^{S} + 2 * n_{O2}^{S}$$

$$3 * n_{SO3}^{S} + 2 * n_{SO2}^{S} + 2 * n_{O2}^{S} - 2 * n_{SO2}^{E} - 2 * n_{O2}^{E} = 0$$

- **Bilan élémentaire sur l'azote N** :

$$2 * n_{N2}^{E} = 2 * n_{N2}^{S}$$

$$2 * n_{N2}^{S} - 2 * n_{N2}^{E} = 0$$

- **Bilan enthalpique :**

$$\begin{pmatrix} n_{SO2}^{E} * H_{SO2}(425°C) + n_{O2}^{E} * H_{O2}(425°C) + n_{N2}^{E} * H_{N2}(425°C) \\ = \\ n_{SO3}^{S} * H_{SO3}(T_1°C) + n_{SO2}^{S} * H_{SO2}(T_1°C) + n_{O2}^{S} * H_{O2}(T_1°C) + n_{N2}^{S} * H_{N2}(T_1°C) \end{pmatrix}$$

3.4.2. 2e lit de conversion

- **Bilan élémentaire sur le soufre S:**

$$1 * n_{SO3}^{E} + 1 * n_{SO2}^{E} = 1 * n_{SO3}^{S} + 1 * n_{SO2}^{S}$$

$$1 * n_{SO3}^{S} + 1 * n_{SO2}^{S} - 1 * n_{SO2}^{E} - 1 * n_{SO3}^{E} = 0$$

- **Bilan élémentaire sur l'oxygène O :**

$$3 * n_{SO3}^{E} + 2 * n_{SO2}^{E} + 2 * n_{O2}^{E} = 3 * n_{SO3}^{S} + 2 * n_{SO2}^{S} + 2 * n_{O2}^{S}$$

- **Bilan élémentaire sur l'azote N** :

$$2 * n_{N2}^{E} = 2 * n_{N2}^{S}$$

$$2 * n_{N2}^{S} - 2 * n_{N2}^{E} = 0$$
$$n_{N2}^{S} = 79 Kmoles$$

- **Bilan enthalpique :**

On va spécifier, à l'entrée de la deuxième masse catalytique, une température du gaz de 443°C et une température du gaz juste à la sortie, de T_2 °C.

$$\begin{pmatrix} n_{SO3}^{E} * H_{SO3}(443°C) + n_{SO2}^{E} * H_{SO2}(443°C) + n_{O2}^{E} * H_{O2}(443°C) + n_{N2}^{E} * H_{N2}(443°C) \\ = \\ n_{SO3}^{S} * H_{SO3}(T_2°C) + n_{SO2}^{S} * H_{SO2}(T_2°C) + n_{O2}^{S} * H_{O2}(T_2°C) + n_{N2}^{S} * H_{N2}(T_2°C) \end{pmatrix}$$

3.4.3. 3e Lit de conversion

On va procéder de la même façon que les autres lits catalytiques pour aboutir aux équations suivantes :

- **Bilan molaire :**

$$n_{SO3}^{S} + n_{SO2}^{S} - 10{,}85 = 0$$

$$3 * n_{SO3}^{S} + 2 * n_{SO2}^{S} + 2 * n_{O2}^{S} - 42 = 0$$

$$n_{N2}^{S} = 79\,Kmoles$$

- **Bilan enthalpique :**

La température du gaz à l'entrée du troisième lit est de 430°C. Au sein de la masse catalytique, le gaz peut atteindre une température de T_3°C. Donc on va réaliser un bilan enthalpique entre ces deux points de température.

$$\begin{pmatrix} n_{SO3}^{E} * H_{SO3}(430°C) + n_{SO2}^{E} * H_{SO2}(430°C) + n_{O2}^{E} * H_{O2}(430°C) + n_{N2}^{E} * H_{N2}(430°C) \\ = \\ n_{SO3}^{S} * H_{SO3}(T_3°C) + n_{SO2}^{S} * H_{SO2}(T_3°C) + n_{O2}^{S} * H_{O2}(T_3°C) + n_{N2}^{S} * H_{N2}(T_3°C) \end{pmatrix}$$

3.5. Formulation de la problématique d'optimisation

L'optimisation dans ce stade d'étude a pour objectif la détermination des paramètres techniques pour assurer les objectifs fixés en tenant compte des contraintes du système.

3.5.1. Fonctions objectives

L'optimisation pour l'éco-fabrication est basée sur le couplage entre les objectifs économiques et les objectifs écologiques. Pour le processus de production d'acide sulfurique, on résume les fonctions économiques dans les coûts d'investissement des équipements thermiques. Ainsi, les fonctions écologiques résument les impacts environnementaux choisis

3.5.2. Fonctions Economiques

Les fonctions économiques utilisées pour cette unité de production résument les coûts de fonctionnement des équipements. Ces coûts représentent les coûts d'investissement et de maintenance pour chaque équipe d'installation. On peut présenter ces fonctions comme suit :

$$CF = f_i \times CRF \times \varphi \qquad (4.35)$$

Avec :

- f_i : Coût d'investissement de l'équipement i.
- CRF : Le facteur annuel de recouvrement du capital.
- φ : Le facteur de maintenance.

En résumé le problème économique peut être décrit comme suit :

$$Min\ (CF)$$

3.5.3. Fonctions Ecologiques

Les critères environnementaux vont être définis à partir de l'expression suivante :

$$FE_i = \sum M_N FP_{i,N} \tag{4.36}$$

Avec :

- FE_i : fardeau environnemental
- M_N : masse (débit massique) de la substance émise N
- $FP_{i,N}$: facteur de potentiel d'impact de la substance N relatif

3.5.4. Contraintes techniques

Les bilans matières et bilans enthalpiques représentent les contraintes à respecter pour ce problème d'optimisation.

3.5.5. Intervalles pour les variables de décision

Comme c'est déjà décrit, les variables de décisions pour la modélisation de l'installation sont : les températures de sorties et le rendement de conversion pour les 3 premiers lits de conversions et la température de sortie du four de combustion.
Les bornes des variables de décisions sont :

$$1000 \leq T_f \leq 1100$$
$$600 \leq T_1 \leq 620$$
$$500 \leq T_2 \leq 530$$
$$450 \leq T_3 \leq 500$$
$$8 \leq X \leq 12$$

Avec :
T_f : La température à la sortie du four.
T_1 : La température à la sortie du premier lit de conversion.
T_2 : La température à la sortie du second lit de conversion.
T_3 : La température à la sortie du troisième lit e conversion.
X : la teneur en SO_2.

3.6. Résultats de simulation

Suite à l'implémentation de notre modèle, la simulation a été développée avec un essaim de 100 particules et les paramètres de l'algorithme $c_1 = 0.9$ et $c_2 = 0.5$. On présente dans ce qui suit l'évolution des différents paramètres de l'installation durant la simulation.

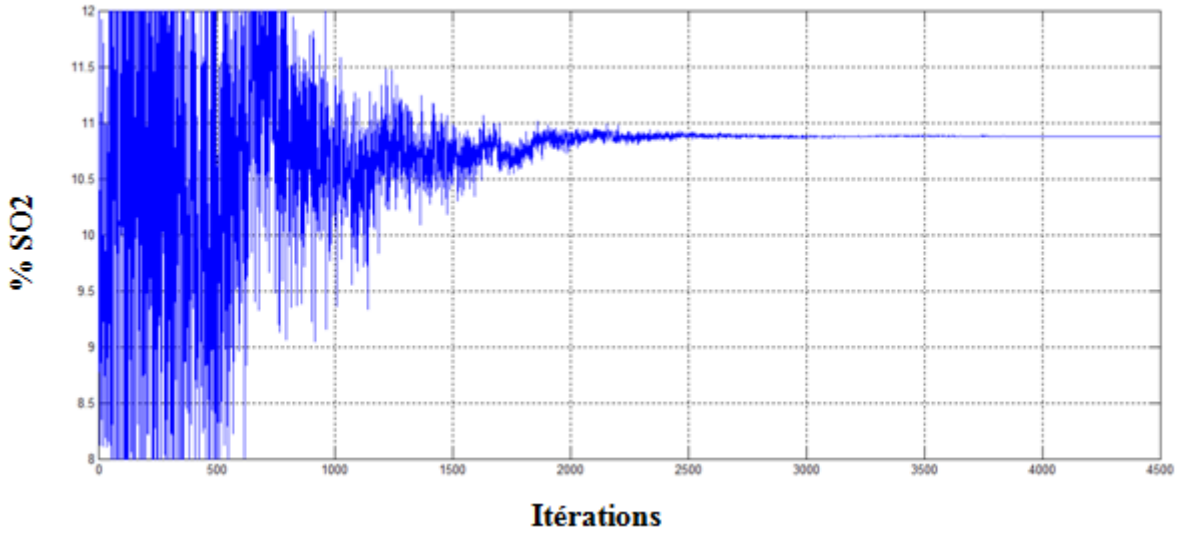


Figure 4.13. *Évolution du taux de dioxyde de soufre*

Le taux optimal de SO_2 pour cette installation est de l'ordre de 10.87. Cette valeur permet le fonctionnement idéal en minimisant le coût d'investissement ainsi que l'acidification durant la phase de fabrication de l'acide sulfurique.

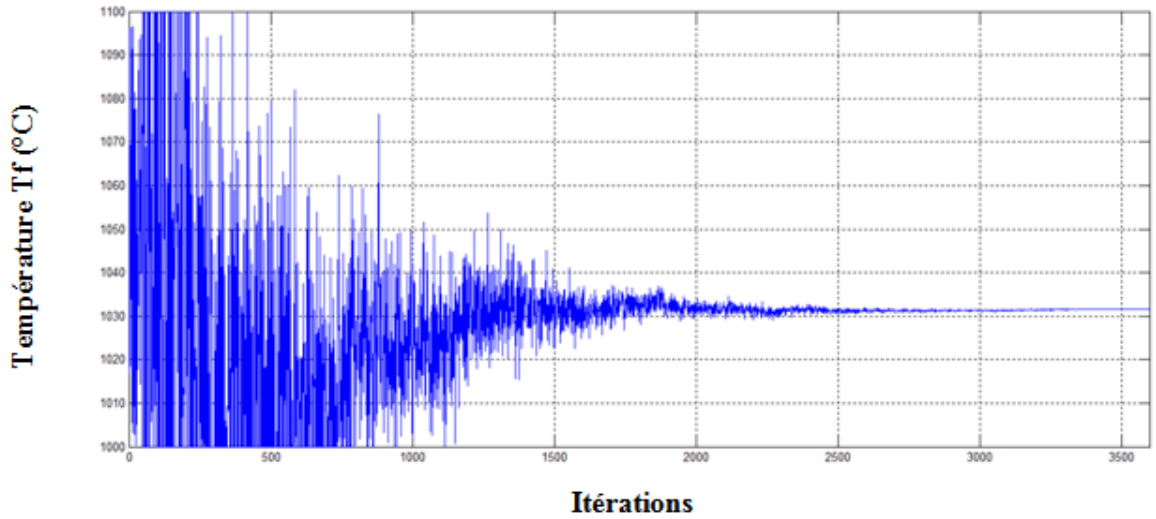


Figure 4.14. *Évolution de la température à la sortie du four*

La température optimale à la sortie du four est T_f=1030 °C qui est une température permettant une récupération d'énergie au niveau d'une chaudière de récupération.

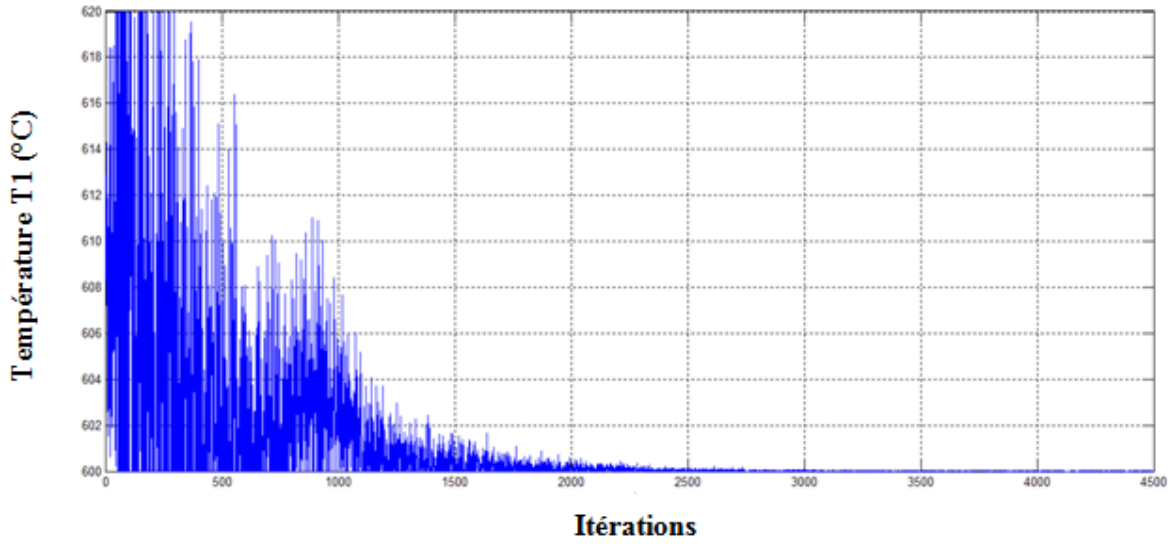


Figure 4.15. *Évolution de la température à la sortie du 1er lit de conversion*

Suite au 1er lit de conversion, la température de sortie est de l'ordre de 600°C. Cette dernière va passer à 443 °C par le passage dans un surchauffeur.

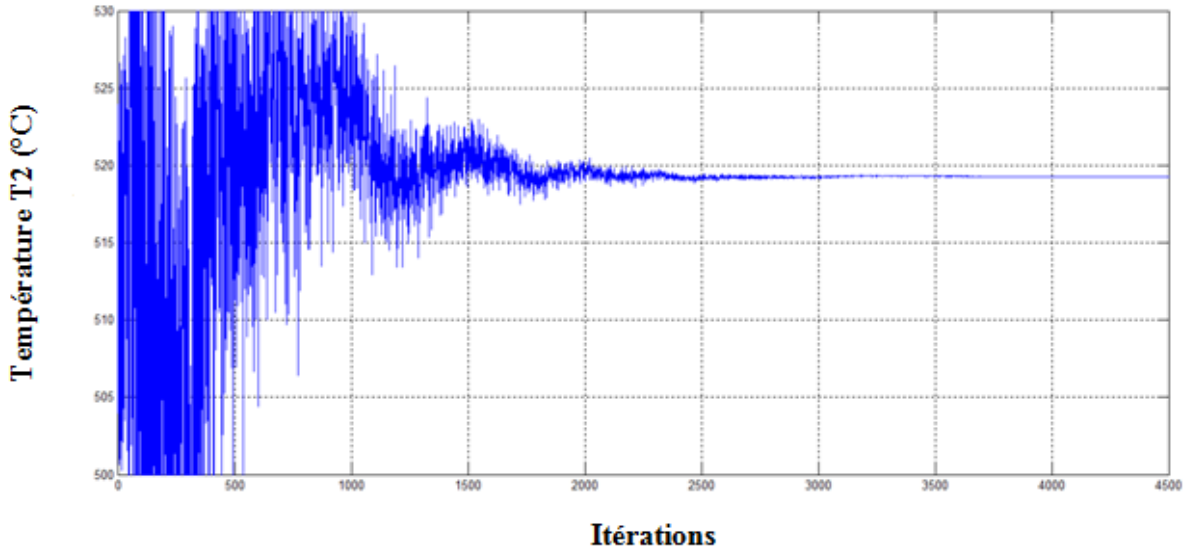


Figure 4.16. *Évolution de la température à la sortie du 2e lit de conversion*

Après le passage dans le surchauffeur, la température optimale à la sortie du 2e lit de conversion vaut 519 °C qui nécessite un échangeur pour refroidir le gaz à 437 °C.

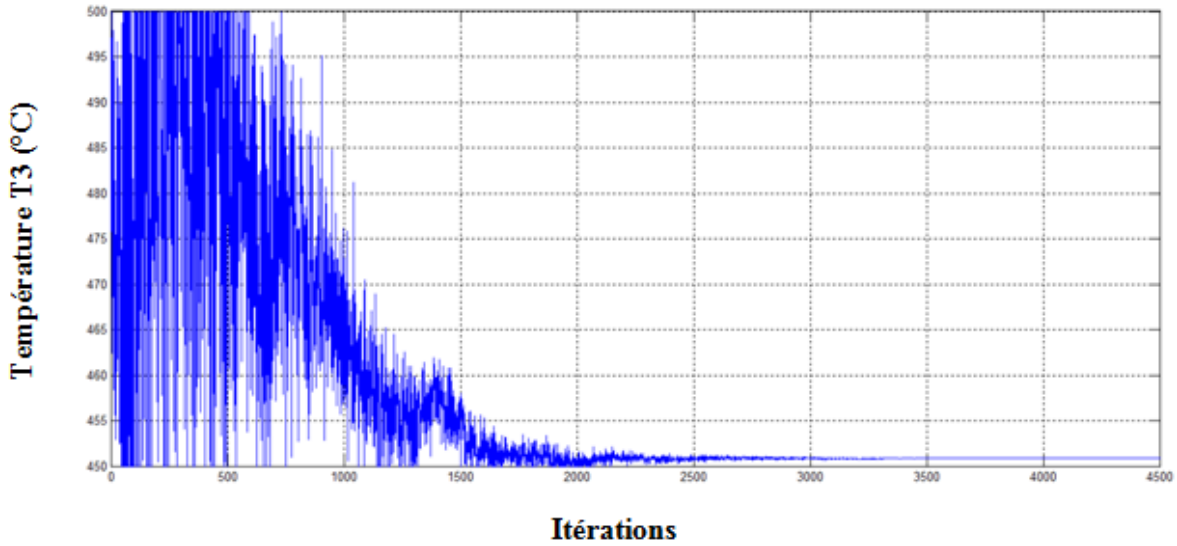


Figure 4.17. *Évolution de la température à la sortie du 3e lit de conversion*

Le gaz à la sortie du 3e lit de conversion est à une température de l'ordre de 451 °C. Par la suite, il passe dans le 2e échangeur pour le refroidissement.

3.7. Discussion

On présente dans le tableau 4.8 le résumé des résultats de simulation ainsi que sa comparaison avec l'état actuel de fonctionnement.

Tableau 4.8. Comparaison entre l'état réel et les résultats d'optimisation

	Optimisation	Cas réel
% SO_2	10.87	10.85
Température T_f	1033	1028
Température T_1	600	617
Température T_2	519	529
Température T_3	451	465
% SO_2 converti en 1er lit	55.944	48.387
% SO_2 converti en 2e lit	81.316	67.456
% SO_2 converti en 3e lit	92.692	87.54

Suite à l'étude d'optimisation, une amélioration remarquable est enregistrée au niveau du rendement ou du taux de la conversion dû SO_2. Ainsi, une diminution de l'empreinte écologique ainsi que le coût d'investissement des équipements de l'installation.

La modélisation de la fabrication de l'acide sulfurique nous montre que les paramètres optimaux nous permettent de garantir un gain écologique et économique : le taux de conversion passe de 87.54 à 92.692%. Le taux du dioxyde de soufre passe de 10.85 à 10.87. Ce dernier paramètre favorise la minimisation des gaz à effet de serre au niveau du tour de lavage utilisé à la fin de la chaîne de fabrication.

L'intégration de l'éco-fabrication pour la fabrication de l'acide sulfurique permet une amélioration globale du comportement économique et écologique de l'unité. Mais cet objectif nécessite un surcoût global comportant la mise en état des machines et par la suite la capabilité machine.

L'unité d'acide sulfurique est équipée d'une installation de refroidissement qui joue un rôle très important pour le maintien des bonnes conditions de fonctionnement (température d'entrée du convertisseur …) ainsi qu'un rôle au niveau de la récupération de l'énergie qui va être par la suite utilisée dans d'autres applications.

3.8. Influence de l'optimisation du processus sur les éléments auxiliaires de refroidissement

On s'intéresse dans cette partie à l'étude de l'installation auxiliaire ou éléments de refroidissement pour mettre l'accent sur l'énergie récupérée ainsi que l'évolution du rendement de ces équipements thermiques.

3.8.1. Surchauffeur

Le surchauffeur reçoit du gaz chaud sortant à environ 600°C de la première masse catalytique et refroidi à environ 430°C avant d'être admis sur la seconde masse. La vapeur saturée à 3,2% à la sortie des économiseurs s'écoule à travers un surchauffeur pour donner de la vapeur surchauffée à 420°C.

On présente à travers le tableau 4.9 les enthalpies des gaz à l'entrée et à la sortie de surchauffeur est :

Tableau 4.9. Enthalpie des gaz à la sortie de surchauffeur

	Entrée (617°C)		Sortie (443°C)
	Moles	H_e(kJ)	H_s(kJ)
SO_2	4,34		0,05161*443-314,3
O_2	6,895		0,03333*443-10,79
N_2	79		0,0311*443-9,797
SO_3	6,51		0,07144*443-420,6
TÔT	96,745	-2867690,1	(3,3758*443-4950,528)*1000

On note que T =443°C représente la température d'entrée pour le 2e lit de conversion.

- Soit H^{S}_{Surch} l'enthalpie du gaz à la sortie du surchauffeur :

$$H^{S}_{Surch} = 3\,455\,048{,}65\,Kj$$

$$\Delta H_{sur} = (1\text{-pertes})*(3\,455\,048{,}65\text{-}\,2\,867\,659{,}45) = 587\,389{,}2\,\text{Kj/ }10{,}85\,\text{moles du soufrebrulées}$$
$$(10{,}85*32 = 347{,}2)$$

- Puissance du surchauffeur :

$$\Delta q_{Surch} = \frac{587\,389{,}2*498{,}75*1000}{347{,}2*24} = 35\,157\,493{,}7\,Kj/h = 8\,398\,827{,}926\,Kcal/h$$

3.8.2. Échangeur gaz-gaz chaud côté calandre

Le gaz sort de la deuxième masse de la catalyse à une température d'environ 530°C et est refroidit dans un échangeur gaz-gaz chaud dans le côté tubes pour alimenter la troisième masse du convertisseur à une température de 430°C dont la conversion se poursuit à 98%.

Tableau 4.10. Enthalpie des gaz à la sortie de l'échangeur GGC côté tubes

	Entrée (529°C)		Sortie (437°C)
	Moles	H_e(kJ)	H_s(kJ)
SO_2	1,411		0,05161*437-314,3
O_2	5,430		0,03333*437-10,79
N_2	79		0,0311*437-9,797
SO_3	9,440		0,07144*437-420,6
TÔT	95,28	-3 455065,229Kj	-3767206,519kJ

N.B *:* T =437°C c'est la température sortie échangeur gaz-gaz-chaud

Soit ΔH_{ech} l'énergie récupérée au niveau de l'échangeur gaz gaz chaud côté tube :

$$\Delta H_{GGC}(CT) = (1\text{-pertes})*(\text{-}3455065{,}229 + 3767206{,}519) = 312\,141{,}29\,\text{Kj/ }10{,}85\,\text{moles de soufrebrûlées}$$
$$(10{,}85*32 = 347{,}2)$$

- Puissance de l'échangeur gaz gaz chaud côté tubes :

$$\Delta q_{GGC}(CT) = \frac{312\ 141{,}29 \ * 498{,}75 * 1000}{347{,}2 * 24} = 18\ 682\ 851{,}92\, Kj/h = 4\ 463\ 175{,}328\, Kcal/h$$

3.8.3. Échangeur gaz-gaz froid côté calandre

Le gaz échappant du troisième lit est riche en SO_3et se refroidit en premier temps de 464°C à 281°C dans un échangeur gaz-gaz froid dans le côté calandre.

Cet échangeur refroidit le flux de gaz du 3e lit et chauffe le flux entrant dans le 4e lit jusqu'à la température de démarrage de la conversion.

Tableau 4.11. Enthalpie des gaz à la sortie de l'échangeur GGF côté calandre

	Entrée (465°C)		Sortie (281°C)
	Moles	H_e(kJ)	H_s(kJ)
SO_2	0,434		0,05161*281-314,3
O_2	4,942		0,03333*281-10,79
N_2	79		0,0311*281-9,797
SO_3	10,416		0,07144*281-420,6
TÔT	94,792	-3767207,69kJ	-4392597,146kJ

$$\Delta H_{GGF}(CC) = (1\text{- pertes})*(-3\,767\,207{,}69 + 4\,392\,597{,}146) = 625\,389{,}456 \text{Kj/}\,10{,}85 \text{moles du soufre brûlées}$$
$$(10{,}85 * 32 = 347{,}2)$$

- Puissance de l'échangeur gaz-gaz-froid côté calandre :

$$\Delta q_{GGF}(CT) = \frac{625\ 389{,}456 \ * 498{,}75 * 1000}{347{,}2 * 24} = 37\ 431\ 954{,}59\, Kj/h = 8\ 942\ 177{,}398\, Kcal/h$$

3.8.4. Économiseur intermédiaire

Le refroidissement du gaz avant l'alimentation de chaque tour d'absorption est assuré par un économiseur. Le gaz de la tour d'absorption intermédiaire est refroidi par l'économiseur intermédiaire de 281°C à 184°C. Le gaz quitte la quatrième couche et s'écoule à travers l'économiseur final dont il se refroidit de 445°C à 157°C.

Le tableau 4.12 résume le bilan enthalpique de l'économiseur intermédiaire.

Tableau 4.12. Enthalpie des gaz à la sortie de l'économiseur intermédiaire

	Entrée (281°C)		Sortie (184°C)
	Moles	H_e(kJ)	H_s(kJ)
SO_2	0,434		0,05161*184-314,3
O_2	4,942		0,03333*184-10,79
N_2	79		0,0311*184-9,797
SO_3	10,416		0,07144*184-420,6
TÔT	94,792	-4392597,146	-4721246,206

$$\Delta H_{\text{Eco Inter}} = (1\text{- pertes})*(-4392597{,}146 + 4721246{,}206) = 328\,649{,}06\text{Kj/ }10{,}85\text{moles du soufrebrûlées}$$
$$(10{,}85*32 = 347{,}2)$$

- Puissance de l'économiseur intermédiaire :

$$\Delta q_{Eco\ Inter} = \frac{328\ 649{,}06\ *498{,}75*1000}{347{,}2*24} = 19\ 670\ 905{,}18\,Kj/h = 4\ 699\ 212{,}895\,Kcal/h$$

3.8.5. Échangeur GGF côté tubes

En admettant que l'absorption du SO3 soit totale, la réaction qui a lieu au niveau de la tour d'absorption intermédiaire est :

$$SO_3 + H_2O \rightarrow H_2SO_4 + 32800\ Kcal/kmoles\ de\ H_2SO_4$$

D'après la réaction d'absorption, la conversion de 10,416Kmoles de SO3 nécessite 10,416 Kmoles d'eau pour donner 10,416Kmoles de H_2SO_4 purs.

Le gaz sortant de la tour se réchauffe à travers l'échangeur gaz gaz froid dans le côté tube et puis l'échangeur gaz gaz chaud dans le côté calandre pour alimenter le 4e lit avec une température de 430°C.

Sachant que le gaz sort de la tour en équilibre thermique avec l'acide sulfurique entrant, on peut déterminer l'enthalpie du gaz à la sortie (tableau 4.13) :

Tableau 4.13. Enthalpie des gaz à la sortie de la tour intermédiaire

	Entrée (184°C)		Sortie (83°C)	
	Moles	H_e(kJ)	Moles	H_s(kJ)
SO_2	0,434		0,434	0,05161*83-314,3
O_2	4,942		4,942	0,03333*83-10,79
N_2	79		79	0,0311*83-9,797
SO_3	10,416		0	0,07144*83-420,6
TÔT	94,792	-4721246,21	84,376	-744,24

L'enthalpie du gaz à l'entrée et à la sortie de la tour intermédiaire :

$$H_{Tour}^{E} = -4\,721\,246{,}21Kj$$
$$H_{Tour}^{S} = -744240Kj$$

3.8.6. Échangeur GGC côté calandre

Le gaz passe dans l'échangeur gaz-gaz chaud par la côté calandre par ramener la température à 430°c qui représente la température d'entrée du 4e lit catalytique de conversion.
Le bilan enthalpique de cet élément est décrit à travers le tableau 4.14.

Tableau 4.14. Enthalpie des gaz à la sortie de l'échangeur GGF côté calandre

	Entrée (280°C)		Sortie (430°C)
	Moles	H_e(kJ)	H_s(kJ)
SO_2	0,434		0,05161*430-314,3
O_2	4,942		0,03333*430-10,79
N_2	79		0,0311*430-9,797
TÔT	84,376	-223 369,012kJ	173 233,328kJ

$$\Delta H_{GGC}(CC) = (1\text{-pertes})*(173233{,}328 + 223\,369{,}012) = 396\,602{,}34\text{Kj}/10{,}85\text{Kmoles du soufrebrûlée}$$
$$(10{,}85*32 = 347{,}2\text{Kg du soufreliquide})$$

La puissance de l'échangeur gaz gaz chaud côté calandre est :

$$\Delta q_{GGC}(CC) = \frac{396\ 602{,}34\ * 498{,}75 * 1000}{347{,}2 * 24} = 23\ 738\ 169{,}29\, Kj/h = 5\ 670\ 847{,}896\, Kcal/h$$

3.8.7. Discussion

L'optimisation des paramètres techniques des procédés de la chaîne de fabrication de l'acide sulfurique entraîne un gain au niveau de l'énergie récupéré dans l'installation de refroidissement. En effet, la société est équipée d'une installation de récupération d'énergie pour l'utiliser dans la production de l'énergie électrique.
À l'aide de l'application de la démarche précédente d'éco-fabrication, l'énergie récupérée augmente par rapport à l'état actuel de la société. Ce résultat est dû à la maîtrise des paramètres des procédés en intégrant l'objectif écologique dés la phase d'étude de la fabrication.

Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre l'optimisation des conditions de coupe en usinage à l'aide d'une optimisation multi objectif assurant le couplage des objectifs écologiques et économiques.
L'optimisation par essaim particulaire montre l'efficacité du modèle en termes de précision des résultats et le temps de réponse.
Pour le problème d'agrégation, nous avons traité le problème d'optimisation avec un poids fixe égal. Mais, une approche de l'agrégation pour l'optimisation en éco-fabrication peut être développée.
En tournage, nous concluons qu'on peut agir sur la vitesse de coupe pour réduire le coût, le temps et la consommation d'énergie à la production. L'avance est légèrement influente dans les résultats.
Ainsi, pour atteindre le respect de l'écologie, nous remarquons que la charge économique est nécessaire. Ceci est remarquable en termes de variation de la fonction objective sur la base de la profondeur de passe.
En fraisage, la qualité de surface obtenue a été modélisée comme un objectif à atteindre. Les résultats montrent une efficacité de l'OEP dans le couplage entre les différents objectifs.
La méthode mise au point peut être étendue à d'autres processus d'usinage et nous pouvons développer d'autres fonctions objectives qui reprennent d'autres piliers de l'éco-fabrication.
Ensuite, pour atteindre la fabrication avec faibles émissions deCO_2, le pilier des matériaux peut être l'un des axes à développer.
Pour l'unité d'acide sulfurique, l'application des modifications selon l'étude présentée peut améliorer le comportement écologique ainsi qu'économique de cette unité. Ainsi, l'installation de refroidissement représente un point clé que peut être à l'origine d'une amélioration écologique importante. La récupération de l'énergie et son utilisation au sein de l'industrie permet de réduire les effets néfastes ainsi qu'un économique suite à la récupération d'énergie.

Conclusion générale et perspectives

L'éco-conception est définie comme étant l'intégration des caractéristiques environnementales dans la conception du produit en vue d'améliorer la performance environnementale du produit tout au long de son cycle de vie. Le résumé des travaux dans ce domaine a été présenté sous la forme de la norme NF E01-005. Cette dernière propose une méthodologie d'éco-conception adaptée aux produits mécaniques, qui tient compte des lignes directrices développées dans le XP ISO/TR 14062, *Mangement environnemental-intégration des aspects environnementaux dans la conception et le développement de produit.*

Certaines limites se présentent au niveau de cette norme dont on peut citer :

- Au niveau de la fabrication : le questionnaire de l'annexe A pour l'aspect environnementale ne donne aucune importance pour les processus de fabrication et la manière de mise en œuvre (avec ou sans enlèvement de la matière) …
- Aucune intégration des matériaux d'addition utilisés dans la phase de fabrication telle que les lubrifiants dans l'usinage, les catalyseurs dans les réactions chimiques…

Les travaux de thèse présentés dans ce rapport représentent une contribution à l'amélioration de la modélisation de l'éco-fabrication. Les études développées dans ce domaine sont basées sur trois piliers différents : énergie, procédé et matériaux.

Nous avons développé deux approches pour la modélisation de l'éco-fabrication. D'une part, nous avons présenté une approche orientée process basée sur l'intégration des outils d'aide à la décision. Cette approche a pour objectif l'aide à la décision pour le choix d'un scénario de fabrication en respectant les objectifs écologiques et économiques. D'autre part, la deuxième approche développée représente l'approche produit. Cette approche permet, à partir des données d'éco-conception de préparer les procédés utiles pour la fabrication du produit étudié avec les paramètres optimaux. Ces derniers sont déterminés en tenant compte des objectifs économiques et écologiques et en respectant les contraintes de la faisabilité technique.

L'approche process est basée sur l'intégration des méthodes d'aide à la décision pour la modélisation de l'éco-fabrication. Cette intégration est illustrée sous forme de deux niveaux : le premier niveau est le choix des indicateurs environnementaux. Ce choix permet d'orienter la phase de quantification des effets écologiques vers des objectifs cibles faciles à interpréter. Pour cette méthodologie, nous avons adopté la méthode EVAMIX. Cette méthode a l'avantage de la modélisation de préférences cardinales et ordinales. À ce niveau de l'approche, la décision ainsi que les réglementations sont les deux acteurs principaux. Le deuxième niveau est le choix final du scénario de fabrication où nous avons adopté la méthode Promethee.

L'approche produit est basée sur la modélisation de la consommation des ressources et l'optimisation multi objectifs des paramètres des procédés étudiés. Au niveau de

l'optimisation multi objectifs, l'essaim particulaire a été l'algorithme utilisé. Cet outil nous a garanti une précision des résultats traités ainsi que la localisation du front de Pareto. La consommation des ressources nous a permis d'établir la relation entre les entrées-sorties du pilier des matériaux.

Pour les études de cas développées, deux types d'applications ont été présentées dans cette thèse : les opérations d'usinage dans le cas du tournage et de fraisage et la production de l'acide phosphorique. Dans ces différents cas d'étude, nous avons pu préparer une base de données écologique permettant de décrire le comportement environnemental du produit étudié.

Pour le cas de l'usinage, l'approche produit nous a permis de présenter les paramètres optimaux de chaque opération étudiée en couplant les objectifs écologiques et économiques. Ainsi, l'algorithme IPO a garanti la description de la trajectoire du flux des matières utilisé : matériaux primaires ainsi qu'auxiliaires.

Pour le cas de la fabrication de l'acide phosphorique et pour l'état actuel de la société, nous avons appliqué l'approche process pour l'étude des 3 scénarios les plus fréquents actuellement. On a constaté, suite à l'étude traitée dans le deuxième chapitre, que le scénario actuel est le plus favorable selon les stratégies de la société ainsi que les réglementations.

En traitant l'état du comportement écologique de l'usine, nous avons constaté que la fabrication de l'acide sulfurique est la phase la plus génératrice des émissions néfastes. La solution a été l'approche produit permettant la modélisation du processus en tenant compte des objectifs écologiques et économiques. La modélisation de cette unité de fabrication nous a permis la préparation d'une base des données paramétriques traitant l'optimisation des paramètres du procédé ainsi que la maîtrise de la consommation des ressources.

Suite aux différents travaux présentés dans cette thèse, nous pouvons préciser que les deux approches développées nous ont permis de préparer une ossature pour la généralisation de l'intégration de l'éco-fabrication dans les industries manufacturières. Cette progression dans le domaine peut être l'origine de la préparation d'une norme traitant l'éco-fabrication. Cette norme une fois développée peut enrichir celle présentée dans le cadre de l'éco-conception.

Pour la mise en place de la notion d'éco-fabrication certaines carences ou axes de progression peuvent se présenter :

- Le développement d'une solution pour le cas d'une usine à coproduits. Le développement ou l'éco-conception d'un process de fabrication permettant de tenir en compte des différentes spécificités des produits étudiés.
- La mise en œuvre de la notion de l'économie circulaire : les déchets de la fabrication sont récupérés pour être des ressources pour la même usine ou pour d'autre usine.
- L'éco-fabrication doit être améliorée avec l'intégration de certains indicateurs pouvant aider le fabricant à prendre les décisions convenablement pour préparer les lignes d'amélioration écologique possible.

- La modélisation et l'intégration du surcoût généré par la prise en considération de l'aspect écologique dans la fabrication du produit étudié.
- La modélisation et la simulation de l'élimination des déchets de la fabrication : les modèles produits peuvent être intégrés dans la phase d'optimisation comme étant une contrainte écologique.
- La modélisation de la consommation des ressources à l'aide des algorithmes IPO permet de décrire le flux des entrées-sorties du système de fabrication. Cependant, on peut passer à une modélisation numérique permettant l'optimisation de l'utilisation des ressources en éco-fabrication.
- La technologie représente l'un des piliers importants de l'éco-fabrication qui nécessite une intégration dans la démarche globale de l'éco-fabrication : la modélisation des données des machines, en tenant compte des différents fournisseurs, représente l'un des points d'amélioration dans ce domaine.

Références Bibliographiques

(ADEME , 2002) ADEME (2002). Produits renouvelables, vers un nouvel âge d'or du végétal ? Colloque ADEME, Synthèse des débats, 15 janvier.

(Ananda. J et al, 2005) ANANDA J. HERATH G.: « Analysis Evaluating public risk preferences in forest land-use choices using multi-attribute utility theory», Ecological Economics 55- 408– 419, 2005.

(Avram OI et al, 2011) Avram, O.I., Xirouchakis, P., 2011. Evaluating the use phase energy requirements of a machine tool system. Journal of Cleaner Production 19 (6e7), 699e711.

(Ayadi. D et al, 2009) AYADI D. AZZABI L. KOBI A. ROBLEDO C. CHABCHOUB H.: « Hiérarchisation des risques des matières dangereuses : application de la méthode Macbeth» 8éme Congrès Qualité et Sûreté de Fonctionnement, QUALITA'2009.

(Ayadi. D et al, 2010) AYADI D. AZZABI L. KOBI A. ROBLEDO C. CHABCHOUB H.: « Application de la méthode multicritère d'aide à la décision PROMETHEE pour le système HACCP », International Metrology Conference CAFMET, 2010

(Azzabi. L et al, 2008) AZZABI L. AYADI D. KOBI A. ROBLEDO C. BOUJELBENE Y. : « Une approche multicritère pour la localisation des défauts de production», conférence internationale Maîtrise et Management des Risques Industriels, M2RI, 2008.

(Azzabi. L et al, 2010) AZZABI L. AYADI D. KOBI A. ROBLEDO C. BOUJELBENE Y. «Outils multicritère d'aide à la décision pour le diagnostic des procédés industriels », International Metrology Conference CAFMET, 2010

(Bakkar C, 1995) BAKKAR C. (1995), Environmental Information for Industrial Designers, Thèse de doctorat, Delft University of Technology, Delft, Pays-Bas, 221 p.

(Ball PD et al, 2009) Ball, P. D., Evans, S., Lever, A., and Ellison, D. (2009). "Zero carbon manufacturing facility towards integrating material, energy and waste process flows." Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture 223: 1085-1096.

(Baskar N et al, 2005) Baskar, N.; Asokan, P.; Saravanan, R.; Prabhaharan, G.(2005), Optimization of Machining Parameters for Milling Operations Using Non-conventional Methods, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol.25, 1078-1088.

(Berr, 2009) BERR (2009) Energy consumption in the United Kingdom: industrial data tables, 2008 update, Department for Business, Enterprise and Regulatory Reform. Available at: http://www.berr.gov.uk/files/file47215.xls [Accessed 01 June 2009]

(Belaidi I, 2007) Belaidi, I. (2007), A model based on the NSGA-II for multi-objective optimization of Roughing parameters, Colloquy AIP-PRIMECA, La Plagne.

(Boustead I, 1993) BOUSTEAD I. (1993), Eco-profiles of the European plastics industry; report n°X, PWMI, Bruxelles, Belgique.

(Branker K et al, 2011) Branker, K., Jeswiet, J., and Kim, I. Y., (2011), "Greenhouse Gases Emitted in Manufacturing a Product—A New Economic Model," CIRP Annals - Manufacturing Technology, 60(1), pp. 53-56.

(Brezet J.C 1997) BREZET J.C (1997), Dynamics in eco-design practice, UNEP industry and Environment, Vol.20, N° 1-2, pp.21-24, Paris.

(Brezeet H et Van Hemel C, 1997) H. Brezeet and C. Van Hemel. EcoDesign: A promising approach to sustainable production and consumption, UNEP, France, 1997.

(Brezet J C, 1997) J.-C. Brezet. Dynamics in ecodesign practice, UNEP Industry and Environment, 20 (1-2): 21-24, 1997.

(Brissaud D et Zwolinski P, 2004): D. Brissaud, P. Zwolinski (2004) End-of-Life-Based Negotiation Throughout the Design Process. Laboratoire Sols, Solides, Structures University of Grenoble BP 53, 38041 Grenoble Cedex 9, France

(Caillet R .2003) CAILLET R. **:** «Analyse multicritère : études et comparaison des méthodes existantes en vue d'une application en analyse d'un cycle de vie », Série scientifique, Montréal.

(Cao H et al, 2005) Cao H J, Liu F, Yan C P. Environmental impact evaluation method of manufacturing process and its case. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(6): 163–167.

(Chen RW et al, 1995) CHEN R.W, NAVIN-CHANDRA D, NAIR I, PRINZ F, WADEHRA I L. (1995), In Selection-Approach for Material Selection that Integrates Mechanical design and life cycle Environmental Burdens, IEEE' 95 Symposium on Electronics and the Environment, Orlando USA

(Chibane H et al, 2011) Chibane, H.; Serra, R.; Leroy, R. (2011), Implementation of a multi-objective optimization shooting a 100C6 steel: compromise between surface quality and productivity. 20th French Congress of Mechanics.

(Chris Y et al, 2012) Chris Yuan, Qiang Zhai, David Dornfeld, (2012), "A three dimensional system approach for environmentally sustainable manufacturing", CIRP Annals-Manufacturing Technology 61, pp 39-42.

(Ciurana. J et al, 2009) J. Ciurana, G. Arias, T. Ozel, Neural network modeling and particle swarm optimization (PSO) of process parameters in pulsed laser micromachining of hardened AISI H13 Steel, Materials and Manufacturing Processes 24 (3) (2009) 358–368.

(Cus F et Balic J, 2003) Cus, F.; Balic, J. (2003), Optimization of cutting process by GA approach. Robot Comput-Integr Manuf , vol. 19,113–121.

(Cus. F et al, 2006) F. Cus, U. Zuperl, E. Kiker, M. Milfelner, Adaptive controller design for feedrate maximization of machining process, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 17 (2006) 237-240.

(Dahmus J et Gutowski T, 2004) Dahmus, J. and Gutowski, T. (2004) An Environmental Analysis of Machining, *Proceedings of the 2004 ASME International Mechanical Engineering Congress and RD&D Exposition*, Anaheim, California, USA.

(De Fillippi A et Ippolito R, 1981) De Fillippi, A.; Ippolito, R.(1981), NC machine tools as Electric Energy Users, CIRP Annals, vol.30,323-326.

(De Keyser et Peeters P, 1996) De Keyser, W. and Peeters, P. (1996) 'Theory and methodology – a note on the use of PROMETHEE multicriteria methods', European Journal of Operational Research, Vol. 89, pp.457–461.

(Devoldere T et al, 2007) Devoldere, T., Dewulf, W., Deprez, W., Willems, B., Duflou, R.J. 2007, Improvement Potentials for Energy Consumption in Disrecte Part Production Machines. Proceedings of the 14th CIRP Conference on Life Cycle Engineering, Tokyo, Japan. 311-316.

(Diaz N et al, 2009) Diaz, N., Helu, M., Jarvis, A., S. Tonissen, Dornfeld, D. and Schlosser, R. (2009) Strategies for Minimum Energy Operation for Precision Machining, *Proceedings of MTTRF 2009 Annual Meeting Shanghai*, PRC.

(Diaz N et al, 2011) Diaz, N.; Redelsheimer, E.; Dornfeld, D. (2011), Energy Consumption Characterization and Reduction Strategies for Milling Machine Tool Use, Globalized Solutions for Sustainability in Manufacturing, pp. 263-267.

(Diaz. N et al, 2010) Diaz, N.; Helu, M.; Jayanathan, S.; Chen, Y.; Horvath, A.; Dornfeld, D. (2010): Environmental Analysis of Milling Machine Tool Use in Various Manufacturing Environments, IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology (ISSST2010), Washington, D.C.

(Dietmair A et Verl A, 2008) Dietmair, A., and Verl, A., (2008), "Energy Consumption Modeling and Optimization for Production Machines," IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies, pp 574-579.

(Draganescu F et al, 2003) Draganescu, F., Gheorghe, M., Doicin, C.V., 2003. Models of machine tool efficiency and specific consumed energy. Journal of Materials Processing Technology 141 (1), 9e15.

(Eastlick DD et al, 2011) Eastlick, D. D., Sahakian, M. V., and Haapala, K. R., (2011), "Sustainable Manufacturing Analysis for Titanium Components," Proc. 2011 ASME IDETC/CIE: 16th Design for Manufacturing and the Lifecycle Conference (DFMLC), Paper DETC2011-48854, August 28-31, Washington, D.C.

(EC-JRC, 2010) EC-JRC (2010). http://lca.jrc.ec.europa.eu/lcainfohub/toolList.vm#. European Commission, Joint Reaserch Center, Site internet consulté en août 2010.

(Fang K et al, 2011) Fang, K.; Uhan, N.; Zhao, F.; Sutherland, J. W.(2011), A New Approach to Scheduling in Manufacturing for Power Consumption and Carbon Footprint Reduction, Journal of Manufacturing Systems, Vol. 30, No 4, 234-240.

(Fang K et al, 2011) Fang, K., Uhan, N., Zhao, F., and Sutherland, J. W., (2011), "A New Approach to Scheduling in Manufacturing for Power Consumption and Carbon Footprint Reduction," Journal of Manufacturing Systems, Vol. 30(4), 2011, pp. 234-240.

(Gatherine M. Rose et al. 2002): Gatherine M. Rose, Kosuke Ishii, Ab Stevels (2002) Influencing Design to Improve Product End-of-Life Stage. Research in Engineering Design 13 (2002) 83-93. DOI 10.1007/S001630100006.

(Geldermann J et Rentz O, 2005) Geldermann, J. and Rentz, O. (2005) 'Multicriteria analysis for the assessment of environmentally relevant installations', Journal of Industrial Ecology.

(Giachetti R E, 1998) Giachetti, R. E., (1998), "A Decision Support System for Material and Manufacturing Process Selection," Journal of Intelligent Manufacturing, Vol. 9, No. 3, pp. 265-276.

(GIEC, 2001) Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (2001). Bilan 2001 des changements climatiques : éléments scientifiques. Rapport du groupe de travail I du GIEC, OMM / PNUE.

(Guinée JB et al, 2001) Guinée, J.B. (final Ed.), Gorrée, M., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R., De Koning, A., Van Oers, L., Wegener Sleeswijk, A., Suh, S., Udo de Haes, H.A., De Bruijn, H., Van Duin, R., Huijbregts, M.A.J., Lindeijer, E., Roorda, A.A.H. and Weidema, B.P. (2001) 'Life cycle assessment; an operational guide to the ISO standards; Parts 1 and 2', Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment (VROM) and Centre of Environmental Science (CML), Den Haag and Leiden, the Netherlands.

(Guitouni A, 1998) Guitouni A. L'Ingénierie du Choix d'une Procédure d'Agrégation Multicritère. Thèse de Doctorat, Université Laval, 1998

(Guitouni A et al, 1999) Guitouni A, Martel J-M, Vincke Ph. Un Cadre de Référence pour le Choix d'une Procédure d'Agrégation Multicritère. Document de travail, FSA-1999-013, Université Laval, Québec, Canada. 1999

(Gutowski T et al, 2001) Gutowski, T., Murphy, C., Allen, D., Bauer, D., Bras, B., Piwonka, T., Sheng, P., Sutherland, J., Thurston, D., and Wolff, E., (2001), "WTEC Panel Report on Environmentally Benign Manufacturing (EBM)," International Technology Research Institute, World Technology (WTEC) Division, Baltimore, Maryland, http://www.wtec.org/loyola/ebm/ebm.pdf.

(Gutoswki T et al, 2005) Gutowski, T., Murphy, C., Allen, D., Bauer, D., Bras, B., Piwonka, T., Sheng, P., Sutherland, J., Thurston, D., Wolff, E. (2005). "Environmentally benign manufacturing: Observations from Japan, Europe and the United States", Journal of Cleaner Production, 13 (1), pp1-17.

(Gutowski T et al, 2005) Gutowski T, Dahmus J, Dalquist S. Measuring the Environmental Load of Manufacturing Processes. In: Proceedings of International Society for Industrial Ecology (ISIE), Stockholm, Sweden, June 12–15, 2005..

(Gutowski T et al, 2006) Gutowski, T., Dahmus, J., and Thiriez, A., (2006), "Electrical Energy Requirements for Manufacturing Processes," 13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, Leuven, May 31-June 2.

(Gutowski T et al, 2006) Gutowski, T., J. Dahmus, and Thiriez, A., (2006). Electrical Energy Requirements for a Manufacturing Process. *Proceedings of 13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*, Leuven, Belgium, 623-627.

(Haapala K R et al, 2004) Haapala, K. R., Khadke K. N., and Sutherland, J. W., (2004), "Predicting Manufacturing Waste and Energy for Sustainable Product Development via WE-Fab Software," Proceedings of the Global Conference on Sustainable Product Development and Life Cycle Engineering, Berlin, Germany, Vol. 8.

(Hammami A. 2003) HAMMAMI A.: «Modélisation technico-économique d'une chaine logistique dans une entreprise réseau », Thèse de doctorat spécialité Génie industrielle, L'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne.

(Hammami A et al, 2003) Hammami A, Burlat P, Campagne J.P. Evaluating orders allocation within networks of firms. (Article accepté pour publication en 2003 au : International Journal of Production Economics)

(Hammami A et al, 2003) Hammami A, Ait-Kadi D, Burlat P. Prise en Compte de la fiabilité dans un Problème d'Allocation de Commandes. 5ème Congrès International de Génie Industriel - du 26 au 29 octobre 2003 – Québec (Canada)

(Hammami A et al, 2003) Hammami A, Burlat P, Campagne J.P. *Modélisation analytique du problème d'allocation de commande dans un réseau d'entreprises*. 4e Conférence Francophone de MOdélisation et SIMulation : "Organisation et Conduite d'Activités dans l'Industrie et les Services". MOSIM'03 – du 23 au 25 avril 2003 - Toulouse (France).

(Hauschild M et al, 2005) Hauschild, M., Jeswiet, J. and Alting, L., 2005, From Life Cycle Assessment to Sustainable Production: Status and Perspectives, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 54, 1-21.

(Hertwich EG et Hammitt JK, 2000) Hertwich EG, Hammitt JK, Pease W. A Theoritical fouandation for life cycle Assessment : recognizing the roles of values in environmental decision making. Journal of industrial ecology. 4, n°1:2000.

(Hertwich EG et Hammitt JK, 2001) Hertwich EG, Hammitt JK. A decision-analytic Framework for impact assessment, Part 2, Midpoint, End points, and criteria for method development. International Journal of LCA; 6 N°5:265-272;2001.

(Hertwich EG et Hammitt JK, 2001) Hertwich EG, Hammitt JK. Decision-analytic framework for impact assessment. Part I: LCA and decision analytic. International Journal of life cycle assessment; 6 (1): 5-12;2001.

(He Y et al, 2005) He, Y., Liu, F. and Cao, H. J. (2005) Process Planning Support System for Green Manufacturing and its application., *Computer Integrated Manufacturing Systems,* 11**,** (7) 975:980.

(He Y et al, 2007) He, Y., Liu, F., Cao, H. and Zhang, H. (2007) Process Planning Support System for Green Manufacturing and its application, *Frontiers of Mechanical Engineering in China,* **2,** (1) 104-109.

(Heilala J et al, 2008) Heilala, J., Vatanen, S., Tonteri, H., Montonen, J., Lind, S. and Johansson, B. (2008) Simulation based sustainable manufacturing system design, In Proceedings of 2008 Winter Simulation Conference, eds. Mason, S. J., Hill, R. R., Rose, M. O., Jefferson, T. and Fowler, J. W., Piscataway, New Jersey, pp. 1922- 1930.

(Hernandez J C et al, 2006) Hernandez-Matias, J. C., Vizan A., Hidalgo A., and Rios J., (2006), "Evaluation of Techniques for Manufacturing Process Analysis," Journal of Intelligent Manufacturing, Vol. 17, No. 5, pp. 571-583.

(Holloway L et al, 1994) HOLLOWAY L, CLEGG D., TRANTER I., COCKERHAM G. (1994), Incorporating environmental principles into th process design process, Materials and Design, Vol.15, N°5, pp.259-267.

(Inamasu. Y et al, 2010) Inamasu, Y.; Fujishima, M.; Hideta, M.; Noguchi, K. (2010): The Effects of Cutting Condition on Power Consumption of Machine Tools, in: Proceedings of the

4th CIRP International Conference on High Performance Cutting (HPC2010), Vol. 1, pp. 267-270, Gifu, Japan

(Jakobsen K, 1987) JAKOBSEN K (1987), Design principles with special reference to aluminium, Aluminium, pp 56-57, Skanaluminium.

(Jayal A D et al, 2010) Jayal, A.D., Badurdeen, F., Dillon Jr O.W., Jawahir, I.S. (2010), Sustainable Manufactur ing: Modeling and Optimization Challenges at the Product, Process and System Levels, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2:144–15

(Jiang Z G et al, 2008) Jiang, Z.-G.; Zhang, H.; Xiao, M. Analysis model of resource consumption and environmental impact for manufacturing process. Syst. Eng. Theory Pract. 2008, 7, 132–137.

(Jones E et Harrison D, 2000) Jones, E., Harrison, D. (2000). Investing the use of TRIZ in Eco-innovation. TRIZCON2000, Altshuller Institute.

(Johnson E F et Gay A, 1998) JOHNSON.E.F, GAY A. (1998), A Practical Customer-Oriented DFE Methodology, IEEE'95, Orlando, USA.

(Jovane F et al, 2008) Jovane, F., Yoshikawa, H., and Alting, L. et al (2008). "The incoming global technological and industrial revolution towards competitive sustainable manufacturing." CIRP Annals- Manufacturing Technology 57: 641-659.

(Kai J et al, 2012) Kai, J.; Hua, L.; Hong, Z.(2012), Multi-Objective Tooling Optimization for Sustainable Manufacturing, International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA), Vol. 2, Issue 1, 853-862.

(Kara S et Ibbostom S, 2011) S.Kara, S.Ibbostom, (2011),"Embodied energy of manufacturing supply chain", CIRP-Manufacturing Science and Technology (4), pp.317-323.

(Kara S et Ibbotson S, 2012) Kara, S.; Ibbotson, S. (2012), Embodied energy of manufacturing supply chains, Journal of Manufacturing Science and Technology.

(Kara S et Ibbotson S, 2012) S. Kara, S.Ibbotson (2012) "Embodied energy of manufacturing supply chains", Journal of Manufacturing Science and Technology.

(Karaboga. D et Basturk. B, 2008) D. Karaboga, B. Basturk, On the performance of artificial bee colony (ABC) algorithm, Applied Soft Computing 8 (2008) 687–697.

(Kellens K et al, 2011a) Kellens, K.; Dewulf, W.; Overcash, M.; Hauschild, M. Z.; Duflou, J. (2011a), Methodology for Systematic Analysis and Improvement of Manufacturing Unit Process Life-cycle Inventory (UPLCI) – CO2PE Initiative. Part 1: Methodology Description, International Journal of Life Cycle Assessment, vol. 17, 69-78.

(Kellens K et al, 2011b) Kellens, K.; Dewulf, W.; Overcash, M.; Hauschild, M. Z.; Duflou, J. (2011b), Methodology for Systematic Analysis and Improvement of Manufacturing Unit Process Life Cycle Inventory (UPLCI) CO2PE Initiative (Cooperative Effort on Process Emissions in Manufacturing). Part 2: Case studies, International Journal of Life Cycle Assessment, vol. 17, 242-251.

(Kennedy J et Eberhart R, 1995) Kennedy, J.; Eberhart, R. (1995), Particle swarm optimization. In Proc, IEEE int'l conf. on neural networks, volume 4, 1942–1948.

(Kelleens K et al, 2011a) Kellens, K., Dewulf, W., Overcash, M., Hauschild, M. Z., and Duflou, J., (2011a), "Methodology for Systematic Analysis and Improvement of Manufacturing Unit Process Life-cycle Inventory (UPLCI) – CO2PE! Initiative. Part 1: Methodology Description," International Journal of Life Cycle Assessment, vol. 17, pp. 69-78.

(Kelleens K et al, 2011b) Kellens, K., Dewulf, W., Overcash, M., Hauschild, M. Z., Duflou, J., (2011b), "Methodology for Systematic Analysis and Improvement of Manufacturing Unit Process Life Cycle Inventory (UPLCI) CO2PE! Initiative (Cooperative Effort on Process Emissions in Manufacturing). Part 2: Case studies," International Journal of Life Cycle Assessment, vol. 17, pp. 242-251.

(Kennedy J et Eberhart R, 1995) KENNEDY, J. and EBERHART, R. (1995). Particle swarm optimization. In Proc. IEEE int'l conf. on neural networks, volume 4, pages 1942–1948. IEEE service center.

(Kopac. J, 2005) J. Kopac, Influence of high speed cutting on the structure of machined high speed steel material, The Eleventh Scientific Conference on Contemporary Achievements in Mechanics, Manufacturing and Materials Science CAM3S'2005, Gliwice-Zakopane, 2005, 40-44

(Kordonowy, D. N, 2001) Kordonowy, D. N. (2001) A power assessment of machining tools. B.S. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.

(Kordonowy D N, 2002) Kordonowy, D.N., 2002. A power assessment of machining tools. Thesis(BSc). Massachusetts Institute of Technology

(Le Pochat S, 2005) S. Le Pochat. Intégration de l'éco-conception dans les PME : Proposition d'une méthode d'appropriation de savoir-faire pour la conception environnementale des produits. Thèse de Doctorat de l'ENSAM Paris, 2005.

(Le Pochat S et Bertoluci G, 2003) S. Le Pochat, and G. Bertoluci. Consequences for businesses of taking into account environmental constraints. 6th QMOD International Conference, Paris, October 2003

(Le Pochat S, 2005) S. Le Pochat. Intégration de l'éco-conception dans les PME : Proposition d'une méthode d'appropriation de savoir-faire pour la conception environnementale des produits. Thèse de Doctorat de l'ENSAM Paris, 2005

(Leigh S et Ball P, 2012) Leigh Smith, Peter Ball (2012), "Steps towards sustainable manufacturing through modeling material, energy and waste flows" International Journal of Production Economics.

(Lindemann U et al, 2001) Lindemann, U., Hessling, T., Hutterer, P., Mörtl, M. (2001). "Applicable methods for sustainable development for Small and Medium-siezd companies", EcoDesign 2001, 2nd International Symposium on environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, Tokyo

(Lui Y M et Wang C J, 1999) Lui, Y.M.; Wang, C.J. (1999), A modified genetic algorithm based optimization of milling parameters, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol.5, 796–809.

(Manzini B, 1991) Manzini B. (1991), The limits and possibilities of eco-design, Communication lors d'un workshop d'experts."Eco-design of Products", Delft, Pays-Bas.

(Marion PRINÇAUD 2011) : Marion PRINÇAUD (2011) Développement d'un outil d'aide à la décision environnementale basé sur l'Analyse de Cycle de Vie intégré au processus de conception.

(Masui K et al, 2001) Masui, K., Sakao, T., Inaba, A. (2001). "Quality Function Deployment for Environment: QFDE (1st Report) - A methodology in early stage of DfE", EcoDesign 2001 Conference, Tokyo.

(Masui K et al, 2002) Masui, K., Sakao, T., Kobayashi, M., Inaba, A. (2002). "Quality Function Deployment for Environment (QFDE) to spread DfE on the whole company", CARE Innovation 2002, Vienna.

(Maud Dufrene et al, 2013): Maud Dufrene, Peggy Zwolinski, Daniel Brissaud (2013) An engineering platform to support a practical integrated eco-design methodology. Universite´ de Grenoble Alpes, G-SCOP Laboratory, 38000 Grenoble, France. CIRP Annals - Manufacturing Technology 62 (2013) 131–134.

(McAloone T, 2000) T. McAloone. Where's eco-design going ?, Electronics Goes Green, 2000.

(McAloone, T. C, 2000) McAloone, T. C. (2000) Industrial Application of Environmentally Concious Design, Professional Engineering Publishing, London.

(Méndez. M et al, 2006) MÉNDEZ M. GALVÁN B., SALAZAR D. GREINER D. : «Multiple-Objective Genetic Algorithm Using The Multiple Criteria Decision Making Method TOPSIS», MOPGP'06: 7th Int. Conf. on Multi-Objective Programming and Goal Programming, (2006).

(Miettinen P et Hamalainen R P, 1997) Miettinen, P. and Hamalainen, R.P. (1997) 'How to benefit from decision analysis in environmental life cycle assessment (LCA)', European Journal of Operational Research, Vol. 102, pp.279–294.

(Millet D. 1995) Millet D. (1995), Prise en compte de l'environnement en conception: Proposition d'une demarche d'aide à la conception permettant de limiter les fonctions et rejets engendrés par le produit sur son cycle de vie, Thèse de l'ENSAM, Paris, 180 p.

(Mori M et al, 2011) Mori, M., Fujishima, M., Inamasu, Y., Oda, Y., 2011. A study on energy efficiency improvement for machine tools. CIRP Annals e Manufacturing Technology 60 (1), 145e148.

(Munoz A A et Sheng P, 1995) Munoz, A.A.; Sheng, P.(1995), An analytical approach for determining the environmental impact of machining process, Journal of Materials Processing Technology,vol.53,No 3, 736-758

(Nabil. M, 2012) Nabil Mancer, Contribution à l'optimisation de la puissance réactive en présence de dispositifs de compensation dynamique (FACTS), thèse, 2012, Université Mohamed Khider – Biskra Faculté des Sciences et de la technologie

(Nava P, 2009) Nava, P. (2009),Minimizing Carbon Emissions in Metal Forming, M.S. Thesis, Department of Mechanical and Materials Engineering, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada.

(Nor Azlina A, 2011) Nor Azlina, A. (2011), Particle Swarm Optimization for constrained and multi objective problems, International Conference on Management and Artificial Intelligence IPEDR, vol.6.

(Oberender C et al, 2001) Oberender, C., Weger, O., Birkhofer, H., Sauer, J. (2001). "Ecological Design for the use phase: An interdisciplinary approach to Design for Environment", Proceedings of Ecodesign 2001 Conference, IEEE, Tokyo, pp71-76.

(PONS M N, 2008) PONS, M.-N. (2008). Analyse du Cycle de Vie – Comment choisir un logiciel. Techniques de l'Ingénieur G 6 350v2, 15p

(Pusavec F et al, 2010) Pusavec, F., Krajnik, P. and Kopac, J. (2010) Transitioning to sustainable production - Part I: application on machining technologies, Journal of Cleaner Production, 18, (2) 174-184.

(Rahimifard S et al, 2010) S.Rahimifard, Y.Seow, T.Childs, (2010), "Minimising Embodied Product Energy to support energy efficient manufacturing", CIRP Annals-Manufacturing Technology 59, pp 25-28.

(Rahimifard S et al, 2010) Rahimifard, S., Seow, Y., Childs, T., 2010, Minimising Embodied Product Energy to Support Energy Efficient Manufacturing, CIRP Annals—Manufacturing Technology, 59/1: 25–28.

(Rajemi M F et al, 2010) Rajemi, M. F., Mativenga, P. T., and Aramcharoen, A., (2010), "Sustainable Machining: Selection of Optimum Turning Conditions Based on Minimum Energy Considerations," Journal of Cleaner Production, 18(10-11), pp. 1059-1065.

(Rajemi M F et al, 2010) Rajemi, M.F., Mativenga, P.T., Aramcharoen, A., 2010. Sustainable machining: selection of optimum turning conditions based on minimum energy considerations. Journal of Cleaner Production 18 (10e11), 1059e1065.

(Rangarajan. A et Dornfeld. D, 2004) Rangarajan, A.; Dornfeld, D. (2004): Efficient Tool Paths and Part Orientation for Face Milling, in: Annals of the CIRP, Vol. 53, No. 1, pp. 73-76.

(Ritzén S et al, 1997) Ritzén, S., Bäckmar, J., Norell, M. (1997). "Product development – Integration of environmental aspectst", Proceedings of 4th CIRP International Seminar on LCE, June 26-27, Berlin, pp152-162.

(Roy B, 1985) Roy B.Méthodologie multi critère d'aide à la décision. Paris, édition. Economica ; 1985.

(Saaty. T, 2007) Time dependent decision-making; dynamic priorities in the AHP/ANP: Generalizing from points to functions and from real to complex variables», Mathematical and Computer Modelling 46 -860–891, 2007

(Sakao T et al, 2001) Sakao, T., Masui, K., Aizawa, S., Inaba, A. (2001). "Quality Function Deployment for Environment: QFDE (2nd report) – Verifying the applicability by two case studies", EcoDesign 2001 Conference, Tokyo.

(Sakao T et al, 2002) Sakao, T., Masui, K., Kobayashi, M., Inaba, A. (2002). "QFDE (Quality Function Deployment for Environment) and LCA: an effective combiantion of tools for DfE", CARE Innovation 2002, Vienna.

(Saravanan R et al, 2002) Saravanan, R.; Asokan, P.; Sachidanandam, M. (2002) A multi objective genetic algorithm (GA) approach for optimization of surface grinding operations, Int J Mach Tools Manuf , vol.42,1327-1324

(Seong-Rin Lim et al. 2013): Seong-Rin Lim, Yoo Ri Kim, Seung H. Woo, Donghee Park, Jong Moon Park (2013) System optimization for eco-design by using monetization of environmental impacts: a strategy to convert bi-objective to single-objective problems. Journal of Cleaner Production 39 (2013) 303e311.

(Seow Y et Rahimifard S, 2011) Y.Seow and S.Rahimifard (2011), A framework for modeling energy consumption within manufacturing systems, International Journal of Manufacturing Science and Technology, Vol.4, pp 258-264.

(Sharma. AVNL et al, 2012) Sharma. AVNL, P. Sandeep Kumar, A.Gopichand, R.Mohan Rao, International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA) ISSN: 2248-9622 www.ijera.com Vol. 2, Issue 6, November- December 2012, pp.497-500

(Shutong. XIE et Yinbiao. GUO, 2011) Shutong. XIE and Yinbiao. GUO, Intelligent Selection of Machining Parameters in Multi-pass Turnings Using a GA-based Approach, Journal of Computational Information Systems 7:5 (2011) 1714-1721

(Shu-Kai S. Fan et al. 2013) : Shu-Kai S. Fan, Chihhao Fan, Jhong-Hong Yang, Kevin Fong-Rey Liu (2013) Disassembly and recycling cost analysis of waste notebook and the efficiency improvement by re-design process. Journal of Cleaner Production 39 (2013) 209e219.

(Song J S et Lee K M, 2010) Song, J. S., and Lee, K.M. (2010). "Development of a low-carbon product design system based on embedded GHG emissions." Resources, Conservation and Recycling 54: 547-5

(Steven H et al, 2013) Steven, H.; Andreas, D.; Rikard, S.(2013), A Multi-objective Tolerance Optimization Approach for Economic, Ecological, and Social Sustainability, 20th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering Singapore.

(Sutherland J et al, 2008) Sutherland, J. W., Adler, D. P., Haapala, K. R. and Kumar, V., 2008, A comparison of manufacturing and remanufacturing energy intensities with application to diesel engine production, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 57, 5-8.

(Sutherland, J.W. et Gunter K.L., 2001) Sutherland, J.W. and Gunter K.L., (2001), Environmental Attributes of Manufacturing Processes, Chapter 13, Handbook of Environmentally Conscious Manufacturing, Ed. C. N. Madu, Kluwer Academic Publishers, pp. 293-316.

(Tan X et al 2002) Tan, X.C.; Liu, F.; Cao, H.J.; Zhang, H. A decision-making framework model of cutting fluid selection for green manufacturing and a case study. J. Mater. Process. Technol. 2002, 1–3, 467–470.

(Tan X et al, 2006) Tan, X., Liu, F., Dacheng, L., Li, Z., Wang, H. and Zhang, Y. (2006) Improved Methods for Process Routing in Enterprise Production Processes in Terms of Sustainable Development II, Tsinghua Science & Technology, 11, (6) 693-700.

(Tridech, S et Cheng, K, 2008) Tridech, S., and Cheng, K. (2008). Low carbon manufacturing: characterization, theoretical models and implementation. Proceeding of the 6th International Conference on Manufacturing Research (ICMR 08). London, UK: 403-412.

(Tridech S, 2011) S. Tridech, K. Cheng, "Low carbon manufacturing: characterization, theoretical models and implementation," International Journal of Manufacturing Research, 2nd ed.,vol. 6, 2011, pp.110-121.

(Van Hemel.C, 1998) Van Hemel.C (1998), EcoDesign empirically explored design for environment in Dutch Small and Medium sized enterprises, Thèse, Delft University of Technology, Delft, Pays-Bas, 271 p.

(Vijayaraghavan, A. et Dornfeld, D, 2010) Vijayaraghavan, A. and Dornfeld, D. (2010) Automated energy monitoring of machine tools, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 59, (1) 21-24.

(Voratas K, 2012) Voratas, K. (2012), Comparison of three evolutionary algorithms: GA, PSO and DE, International Journal of Industrial Engineering and management systems, vol. 11, No 03, 215-223.

(Wang Z G et al, 2005) Wang, Z.G.; Rahman, M.; Wong, Y.S.; Sun, J. (2005), Optimization of multi-pass milling using parallel genetic algorithm and parallel genetic simulated annealing, International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol. 45, 1726–1734.

(Werner F, 2005) Werner F. Ambiguities in Decision-oriented. The role of Mental Models and values. Springer, ISBN 10 1-4020-3254-4 (e-book);2005.

(Wimmer W et Zust R, 2001) Wimmer, W., Züst, R. (2001). ECODESIGN Pilot. Kluwer Academic Publishers.

(Xue H et al, 2007) Xue, H.; Kumar, V.; Sutherland, J.W. Material flows and environmental impacts of manufacturing systems via aggregated input-output models. J. Clean. Prod. 2007, 13–14, 1349–1358.

(Xue. X et Gu. Y, 2010) X. Xue and Y. Gu, Global optimization based on hybrid clonal selection genetic algorithm for task scheduling, Journal of Computational Information Systems, 6 (1):253-261, 2010.

(Yan He et al 2011) Yan.He, Bo.Liu, Xiaodong.Zhang, Huai.Gao, Xuehui.Liu (2011), A modeling method of task-oriented energy consumption for machining manufacturing system, International Journal of Cleaner Production, Vol.23, pp 167-174.

(Yeo S H et New A K, 1999) Yeo, S. H. and New, A. K. (1999) A Method for Green Process Planning in Electric Discharge Machining, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 15, (4) 287-291.

(Yildiz. AR, 2009) A.R. Yildiz, A novel hybrid immune algorithm for optimization of machining parameters in milling operations, Robotics and Computer Integrated Manufacturing 25 (2) (2009) 261–270.

(Yildiz. AR, 2009) A. R. Yildiz, A novel particle swarm optimization approach for product design and manufacturing, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 40 (5-6):617-628, 2009.

(Zhai. J et al, 2006) J. Zhai, Z. Duan, Y. Li, J. Deng, D. Yu, PSO based neural network optimization and its utilization in a boring machine, Journal of Material Processing Technology 178 (1– 3) (2006) 19–23.

(Zhang H et al, 2000) Zhang H, Liu F. A method for analyzing the product material resource consumption situation of manufacturing systems. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2000, 36(3): 27–31

(Zhang T et al, 2006) Zhang, T. W.; Boyd, S.; Vijayaraghavan, A.; Dornfeld, D. (2006) Energy use in nanoscale manufacturing. Presented at the IEEE Inter- national Symposium on Electronics and the Environment, San Francisco, CA, May 8-11.

(Zitzler E et al, 2003) Zitzler, E.; Laumanns, M.; Bleuler, S. (2003), A tutorial on evolutionary multi objective optimization: Workshop on Multiple Objective Metaheuristics (MOMH 2002), Springer, Berlin Heidelberg New York.

(Zuperl. U et al, 2005) U. Zuperl, F. Cus, M. Milfelner, Fuzzy control strategy for an adaptive force control in end-milling, Journal of Materials Processing Technology 164 (2005) 1472-1478.

Textes réglementaires et normatifs

Directive 2009/125 Directive 2009/125/CE du Parlement Européen et du Conseil du 21 octobre 2009 établissant un cadre pour la fixation d'exigences en matière d'éco-conception applicables aux produits liés à l'énergie.
Directive DEEE Directive 2002/96/CE du Parlement Européen et du Conseil du 27 janvier 2003 relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE), L 37/24, 13.2.2003.
Directive ErP Directive 2009/125/CE (ErP) du Parlement Européen et du Conseil du 21 octobre 2009 établissant un cadre pour la fixation d'exigences en matière d'éco-conception applicables aux produits liés à l'énergie, L 285/10, 31.10.2009.
Directive EuP Directive 2005/32/EC – établissant un cadre pour la fixation d'exigences en matière d'éco-conception applicables aux produits consommateurs d'énergie.
Directive RoHS Directive 2002/95/CE du Parlement Européen et du Conseil du 27 janvier 2003 relative à la limitation de l'utilisation de certaines substances dangereuses dans les équipements électriques et électroniques, L 37/19, 13.2.2003.
Directive VHU Directive 2000/53/CE du Parlement Européen et du Conseil du 18 septembre 2000 relative aux véhicules hors d'usage, L 269/34, 21.10.2000.
ETSI ES 203 215 Environmental Engineering (EE); Measurement Methods and Limits for Power Consumption in Broadband Telecommunication Networks Equipment; V1.1.1, 2010.
ISO 14001 Systèmes de management environnemental - Exigences et lignes directrices pour son utilisation. 2004.
ISO 14031 Management environnemental - Évaluation de la performance environnementale - Lignes directrices. 1999.
ISO 14040 Management environnemental - Analyse du cycle de vie- Principes et cadre. 2006.
ISO 14044 Management environnemental - Analyse du cycle de vie- Exigences et lignes directrices. 2006.
ISO/TR 14062 Management environnemental - Intégration des aspects environnementaux dans la conception et le développement de produit. 2009.
ISO14644-1 Salles propres et environnements maîtrisés apparentés -Partie 1: Classification de la propreté de l'air. 1999.
ISO7816-3 Cartes d'identification - Cartes à circuit intégré : nature des signaux électriques et protocole de transmission entre le terminal et la carte. 2011.
Livre Vert Commission des Communautés Européennes (2001). Livre vert sur la Politique Intégrée de Produits, COM(2001) 68 final, Bruxelles, 07.02.2001.
Règlement REACh Règlement n°1907/2006 du Parlement européen et du Conseil du parlement européen et du conseil du 18 décembre 2006 concernant l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des substances chimiques.

Annexes

Analyse du cycle de vie et application de la méthode Bilan Carbone pour la chaîne de production de l'acide phosphorique

La définition et la mise en place d'une démarche d'éco-fabrication nécessite une très bonne connaissance du produit devant être fabriqué mais aussi de la chaîne logistique associé tout au long de son cycle de vie. Cet objectif entraîne le développement de modèles et de métriques pour simuler tant le produit que le processus de fabrication.

Nous présentons l'analyse du cycle de vie de l'acide phosphorique ainsi que l'application de la méthode *Bilan Carbone* le long de la chaîne de production de ce produit dans le but de quantifier et caractériser les émissions néfaste à la fin de la production. Cette quantification va servir comme un outil d'aide à la décision au sein de la société

1. Application de la méthode Bilan Carbone

Le bilan carbone est une méthode qui nous permet dans le cadre de notre étude de déterminer les émissions de gaz à effet de serre lors de notre activité. On a utilisé la méthode proposée par l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) avec l'utilisation du logiciel « Bilan_Carbone_V6.11 ». Les résultats sont données en tonnes équ CO_2.
La chaîne de production de l'acide phosphorique est composée de 3 unités qui fonctionnent en parallèle : unité de préparation de soufre liquide, unité de production de l'acide sulfurique et l'unité de production de l'acide phosphorique (chapitre 2).
En paramètres d'entrée, nous les avons résumés comme suit :

- Unité de préparation du soufre liquide :

Entrées	Quantité par jour	Quantité annuelle
Energie électrique	0.2 Mw	66 Mw
Vapeur 7 bars	192-240 T	63360 T-79200 T
Vapeur 4 bars	120-144 T	39600 T-47520 T
Adjuvant	350 Kg	115500 Kg
Soufre Solide	1000 T	330000 T

- Unité d'acide sulfurique :

Entrées	Quantité par jour	Quantité annuelle
Energie électrique	0.5 Mw	165 Mw
Soufre Liquide	500 T	165000 T
Air Atmosphérique	480 T	158400 T
Air Sec	3600000 Nm^3	1188000000 Nm^3
Vapeur HP	1845 T	608850 T
Acide Sulfurique produit	1500T	495000 T

- Unité d'acide phosphorique :

Entrées	Quantité par jour	Quantité annuelle
Energie Electrique	14400 Kwh	4752000 Kwh
Eau de mer	43200 m^3	14256000 m^3
Eau Industrielle	4800 m^3	1584000 m^3
Vapeur BP	1500 T	495000 T

Phosphate	2700 T	891000 T
Acide Sulfurique	1740 T	574200 T
Acide Phosphorique Produit	600 T	198000 T

Le bilan carbone a été effectué sur le logiciel par an (330 jours)
Ainsi, concernant les matières premières utilisées, le phosphate est amené de la région de Gafsa par voie des trains ainsi que le soufre solide est transportées du Brésil ou Ukraine par voie maritime suivant des contrats commerciales.

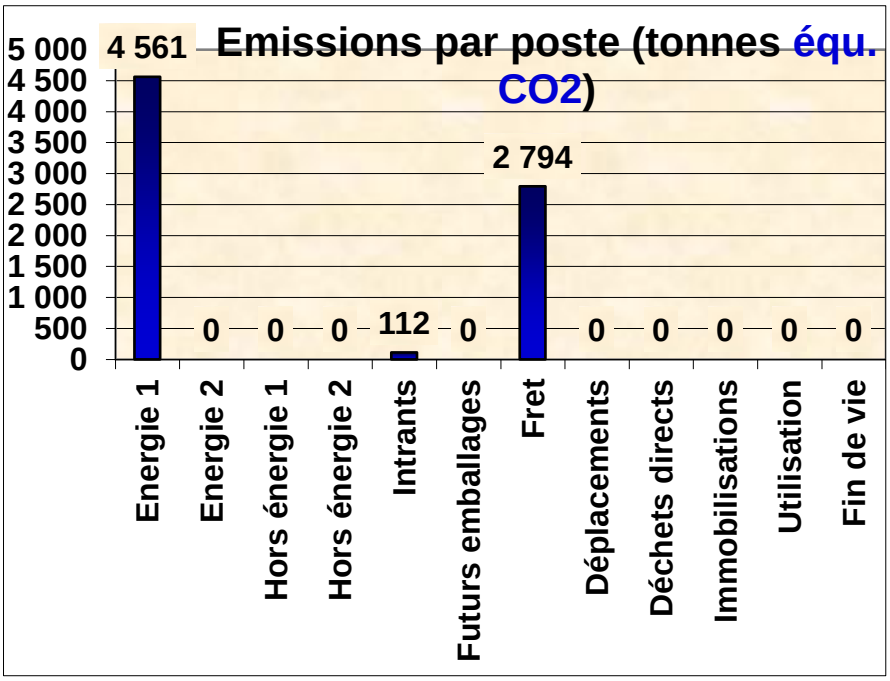


Figure 1. Emissions de la chaîne de production (tonnes équ. CO2)

A l'aide des données d'activités déjà mentionnées pout la société, on remarque que l'élément responsable des émissions est l'énergie. Mais certains impacts ne sont pas étudiés au niveau de cette méthode d'où on ait besoin d'une analyse du cycle de vie en s'aidant du logiciel 'Bilan Produit'.

2. Bilan Produit

Le logiciel Bilan Produit est l'un des outils qui permet de faire de façon simplifiée une analyse du cycle de vie d'un produit, nous l'avons utilisé en l'adaptant à notre chaîne logistique pour déterminer les données des différents paramètres écologiques.
Cette méthodologie est basée sur 8 indicateurs :

- Les indicateurs « Ressources »

- Consommation d'énergie fossile (exprimée en MJ)
- Consommation de ressources rares (en Kg équivalent Antimoine Sb)

- Les indicateurs « Impacts »

- Effet de serre (en Kg équivalent CO_2)
- Acidification (en Kg équivalent SO_2)
- Eutrophisation (en Kg équivalent phosphate PO_4^{3-})
- Ozone troposphérique (en Kg équivalent acétylène C_2H_2)
- Ecotoxicité aquatique (en Kg équivalent 1,4 di-chlorobenzène $C_6H_4CL_2$_DCB)
- Toxicité humaine (en Kg équivalent 1,4 di-chlorobenzène $C_6H_6CL_2$_DCB)

La méthode Bilan Produit est un fichier Excel à compléter avec les données sur le cycle de vie du produit à étudier, les phases de vie sont prédéfinies :

- Phase de production
- Phase de transport
- Phase d'utilisation
- Fin de vie

L'unité fonctionnelle dans notre cas est la production de l'acide phosphorique sur une année (330 jours).

Phase de Production

Aide | Précédent | Suivant | Insérer composant | Effacer sélection | Enregistrer

Tableau des éléments (Composants...) du produit

Sous-ensemble	Nom	Quantité	Unité	Commentaires utilisateur
Acide Phosphorique	H2PO4	5E+08	kg	
Acide Sulfurique	H2SO4	2E+08	kg	
Eau de mer	Eau potable au robinet	14256	kg	
Eau Industriel	Eau déionisée	1584	kg	
Energie Electrique	Electricité haute tension France	4983000	kWh	
Transport du Phosphate	Train de fret européen	1,6E+08	t.km	Distance : 180km Masse transportée : 891000t

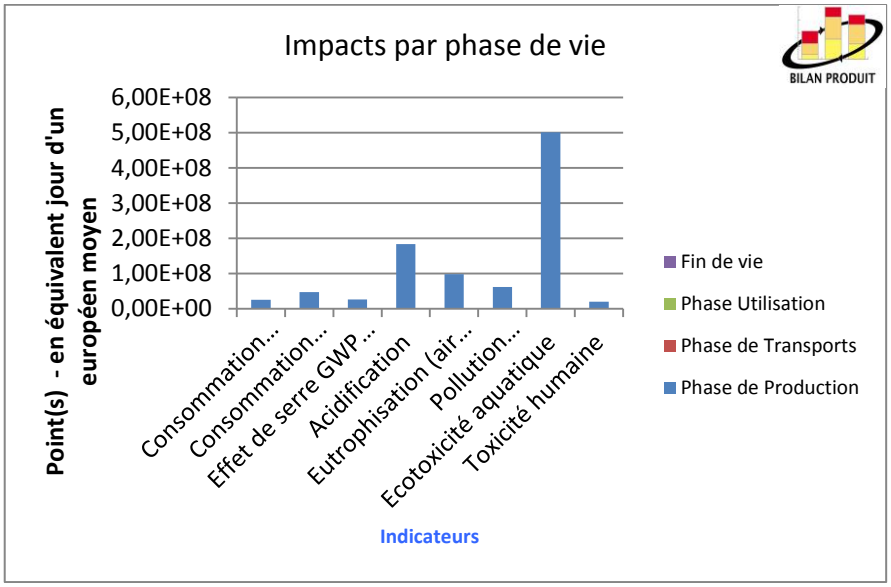


Figure 3. Impacts de la chaîne de production par phase de vie

Les émissions de la chaîne étudiée sont concentrées au niveau de la phase de production car l'acide phosphorique obtenu va être stocké et utilisé au niveau des usines sur le même site industriel.

Ainsi, nous présentons dans ce qui suit la caractérisation des émissions détaillées de la phase de production.

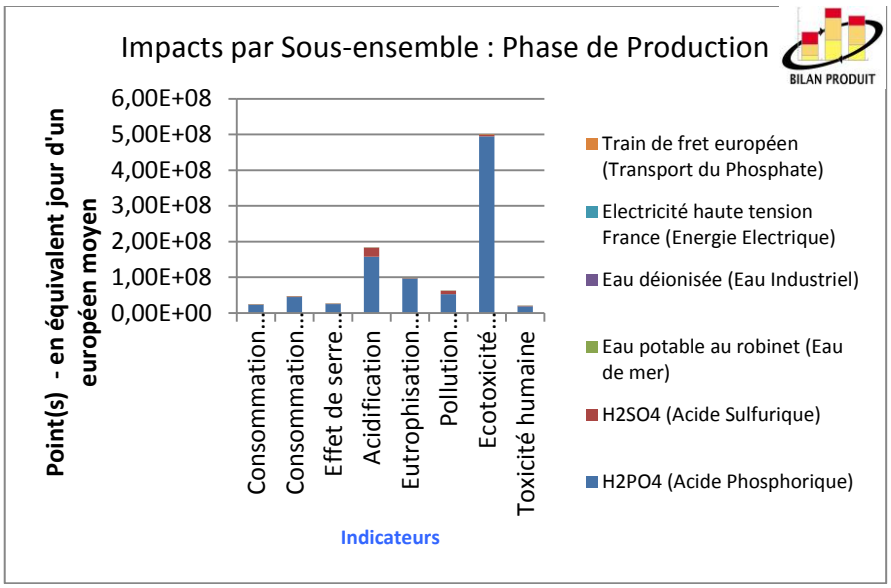


Figure 4. Impacts de la chaîne de production durant la phase de production

L'étude montre que la consommation d'électricité est responsable d'une émission importante ainsi que la fabrication de l'acide sulfurique et de l'acide phosphorique.

Le transport de la matière première ainsi que l'utilisation de l'eau de mer et l'eau industrielle ont peu d'émissions néfaste pour l'environnement.

3. Conclusion

Les résultats d'analyse montrent une grande dépendance en énergie pour cette installation. La méthode 'Bilan Carbone' montre que l'utilisation de l'énergie est responsable de 4561 tonnes équ CO2, d'émission. Mais, le processus de production est responsable de la génération d'une quantité importante d'énergie : 127.19 Kcal/mol, qui est récupérée pour :

- L'alimentation de la soufflante responsable de l'alimentation de l'installation en air atmosphérique.
- La concentration de l'acide phosphorique.

Et le reste sera envoyé avec le vapeur produit au niveau de l'unité de l'acide sulfurique vers la centrale pour la production de l'énergie électrique.

Cette récupération d'énergie peut être à l'origine de certaines pertes à étudier pour un système de production.

Ainsi, au niveau de l'analyse du cycle de vie, on constate que l'Ecotoxicité aquatique est importante de l'ordre de 5.10^8en équivalent jours d'un européen moyen avec une

acidification importante due essentiellement à l'acide sulfurique ainsi que l'acide phosphorique.

En plus de ces impacts évalués à l'aide de l'ACV, nous constatons une quantité importante de phosphogypse résultante comme résidu de la réaction de production de l'acide phosphorique. Ce résidu contient :

- $CaSO_4, 2H_2O$:95%
- Sels de phosphate insoluble : 3.5%
- Autres Impuretés (CaF_2, SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3) :1.5%

A l'aide de ce qui est présenté, nous avons présenté une étude de cycle de vie 'Cradle-to-gate', qui peut être amélioré en quantifiant l'efficacité de la récupération de l'énergie lors du processus de production ainsi que les stratégies de traitement des déchets.

1. Normes Tunisiennes

Norme NT 106-02

Elle définie la qualité des rejets hydriques dans le domaine public maritime, le domaine public hydraulique et les canalisations publiques (ONAS). Le tableau qui suit montre certaines valeurs de la norme NT 106.002 pour les rejets dans le domaine public maritime.

Tableau 1. Valeurs caractérisant la qualité des effluents traités

NT 106.002 Rejet dans le milieu maritime	
Paramètres	Concentration en mg/l
P_{Total}	0.1
SO_4	1000
Fluor	5
Cd	0.005
COT	Valeur non précisée
Température °C	35°C
PH	6.6-8.5

Norme NT 106 04

Elle définie des valeurs guides et valeurs limites de certains polluants dans l'air ambiant.
Pour pouvoir évaluer les effets des polluants atmosphériques sur la santé et l'environnement, il est nécessaire d'en connaître les concentrations dans l'air ambiant et de suivre leur évolution dans l'espace et dans le temps. Ces valeurs de concentrations sont comparées à des normes de référence de la qualité de l'air. Pour une série de polluants, des objectifs de qualité de l'air ont été déterminés par la réglementation qui a fixé des valeurs limites, des valeurs seuils et des valeurs guides :

- Les valeurs limites ont un caractère légal contraignant. Elles ont été fixées dans le but d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs des polluants sur la santé humaine et/ou l'environnement dans son ensemble, ces valeurs sont à atteindre dans un délai donné et à ne pas dépasser une fois atteintes ;
- Le dépassement d'une valeur seuil peut impliquer l'obligation de livrer une information à la population ou inciter à la réalisation d'actions conduisant à une diminution des émissions ;
- Le seuil d'alerte est un niveau au-delà duquel une exposition même de courte durée présente un risque pour la santé humaine et à partir duquel les pouvoirs publics doivent immédiatement prendre des mesures conformément à la réglementation ;
- Les valeurs guides sont destinées pour la prévention à long terme en matière de santé et de protection de l'environnement, qui devront être respectées pour une échéance définie. La Tunisie a fixé des valeurs limites pour différents polluants, définies pour

préserver la santé publique et pour assurer le bien être des citoyens. Ces valeurs sont présentées sur le tableau suivant :

Tableau 2. Norme tunisienne NT 106.04 (homologuée, 1996)

Polluant	Méthode d'analyse	Type de moyenne	Autorisation de dépassement	Valeur limite santé publique	Valeur guide bien être
CO	NT.37.09	8 heures	2 fois/ 30 jours	9 ppm (10 mg/m^3)	9 ppm (10 mg/m^3)
		1 heure	2 fois/ 30 jours	35 ppm (40 mg/m^3)	26 ppm (30 mg/m^3)
NO_2	NT.37.01	Moy annuelle	Non	0.106 ppm (200µg/m^3)	0.080 ppm (150µg/m^3)
		1 heure	1 fois/ 30 jours	0.350 ppm (660µg/m^3)	1 µg
O_3	NT.37.50	1 heure	2 fois/ 30 jours	0.120 ppm (235µg/m^3)	0.077-0.102 ppm (150-200µg/m^3)
Particules en suspension	NT.37.11	Moy annuelle	Non	80 µg/m^3	40 à 60 µg/m^3
		24 heures	1/12 mois	260 µg/m^3	120 µg/m^3
SO_2	NT.37.10	Moy annuelle	non	0.030 ppm (80 µg/m^3)	0.019ppm (50 µg/m^3)
		24 heures	1/12mois	0.12 ppm (365 µg/m^3)	0.041ppm (125 µg/m^3)
		3 heures	1 fois/12 mois	0.5 ppm (1300 µg/m^3)	néant
Pb	NT.37.13	Moyenne annuelle	non	2 µg/m^3	0.5 à 1 pg/m^3
H_2S	NT.37.51	1 heure	1 fois/12 mois	200 µg/m^3	néant

Remarque : On remarque qu'il n'y a pas de réglementation Tunisienne concernant le Fluor.

Textes réglementaires

Déchets

♦ Loi n° 96-41 du 10 juin 1996, relative aux déchets et au contrôle de leur gestion et de leur élimination (les articles 19,26,31,47 ont été modifiés par la loi n° 2001-14 du 30 janvier 2001 portant simplification des procédures administratives relatives aux autorisations délivrées par le ministère de l'environnement et de l'aménagement du territoire dans les domaines de sa compétence).

♦ Décret n° 97-1102 du 2 juin 1997, fixant les conditions et les modalités de reprise et de gestion des sacs d'emballages et des emballages utilisés modifié par le décret n°2001-843 du 10 avril 2001.

♦ Décret n° 2000-2339 du 10 octobre 2000 fixant la liste des déchets dangereux.

♦ Décret n°2002-693 du 1er avril 2002 relatif aux conditions et aux modalités de reprise des huiles lubrifiantes et des filtres à huiles usagées et de leur gestion.
♦ Décret n°2005-3395 du 26 décembre 2005, fixant les conditions et les modalités de collectes des accumulateurs et piles usagées.
♦ Arrêté du ministre de l'Environnement et de l'Aménagement du Territoire du 28 février 2001, portant approbation des cahiers des charges fixant les conditions et les modalités d'exercice des activités de collecte, de transport, de stockage et de valorisation des déchets non dangereux.

Pollution de l'air

♦ Articles 64,67 et 71 du code de la route promulgué par la loi n°99-71 du 26 juillet 1999
♦ Arrêté du ministre de l'Industrie du 13 avril 1996, portant homologation de la norme tunisienne relative à l'air ambiant.
♦ Arrêté du ministre de l'Industrie du 3 avril 1997, portant homologation de la norme tunisienne relative aux valeurs limites d'émission des polluants des ciments.

Pollution des eaux

♦ Décret n° 85-56 du 2 janvier 1985, relatif à la réglementation des rejets dans le milieu récepteur.
♦ Arrêté du ministre de l'Economie Nationale du 20 juillet 1989, portant homologation de la norme tunisienne des rejets en milieu hydrique.

Etudes d'impact :

♦Art. 5 de la loi n° 88-91 du 2 août 1988, portant création d'une Agence Nationale de Protection de l'Environnement telle que modifiée et complétée par la loi n° 92-115 du 30 novembre et la loi n° 2000-14 du 30 janvier 2000 portant simplification des procédures administratives relatives aux autorisations délivrées par le ministère de l'environnement et de l'aménagement du territoire.
♦ Décret n° 2005-1991, relatif à l'étude d'impact sur l'environnement et fixant les catégories d'unités soumises à l'étude d'impact sur l'environnement et les catégories d'unités soumises aux cahiers des charges

2. Recommandations de l'Organisation Mondiale de la Santé OMS/WHO

L'organisation mondiale de la santé OMS a publié en 1999 la deuxième édition des directives de qualité de l'air pour l'Europe (WHO – Air Quality Guidelines for Europe). Ces directives, valeurs guides et informations complémentaires, doivent permettre aux pays d'établir leurs normes nationales et régionales de qualité de l'air afin protéger la santé humaine des effets néfastes de la pollution atmosphérique. Ces directives sont technologiquement pratiques et tiennent compte des contraintes sociales, économiques et culturelles actuelles.

Tableau 3. Valeurs guides de l'OMS - 1999

Polluants	Période	Recommandations O.M.S
SO_2 Dioxyde de soufre et Acidité Forte par extension	année	50 µg/m^3
	Jour	125 µg/m^3
	10 mn	<500 µg/m^3
PS- Poussières en suspension Et FN Fumées Noires	année	
	Jour	
NO_2 Dioxyde d'azote	année	40 µg/m^3
	heure	200 µg/m^3
CO	heure	30 µg/m^3
Fluor	année	1 µg/m^3

Pour les pays non européens, ce sont les valeurs guides de 1990 qui sont à respecter

Tableau 4. Valeurs guides de l'OMS - 1990a

POLLUANTS	PERIODE	VALEURS GUIDES *Pour la prévention à long terme de la santé*	Recommandations O.M.S
SO2 Dioxyde de soufre et Acidité Forte par extension	année	moyenne annuelle inférieure à 40 µg/m^3 ou 60 µg/m^3	50 µg/m^3
	hiver 1er oct. au 31 mars		
	Jour	moyenne inférieure à 100 ou 150 µg/m^3	125 µg/m^3
	heure		< 350 µg/m^3
PS Poussières en suspension et FN Fumées Noires	année	moyenne annuelle inférieure à 40 µg/m^3 ou 60 µg/m^3	50 µg/m^3
	hiver 1er oct. au 31 mars		
	Jour	moyenne inférieure à 100 ou 150 µg/m3	125 µg/m3
NO2 dioxyde d'azote	année	98 %<135 µg/m^3 50 % < 50 µg/m^3	
	jour		150 µg/m^3
	heure		400 µg/m^3
CO	heure	-	30 mg/m^3
Fluor	Moyenne annuelle	0.5 à 3 µg/m^3	1 µg/m^3

3. Législation et réglementations Européennes (UE)

La Communauté Européenne, à l'heure actuelle, est régie par la directive 1999/30/CE du 22 avril 1999, qui fixe les valeurs limites et le nombre maximal des dépassements admis pour l'anhydride sulfureux, le dioxyde d'azote et les oxydes d'azote, les particules et le plomb dans l'air ambiant à l'horizon de 2005 et 2010.
Nous indiquons ci-après les valeurs relatives au SO_2, paramètre qui nous intéresse

Tableau 5. Valeurs de la directive pour le SO_2de la directive 1999/30/CE

Protection	Temps de base	Valeur limite (µg/m^3)	Nombre maximal de dépassement admis
Santé *	1 heure	350	24
	3 heures	--	--
Santé *	24 heures	125	3
Ecosystème **	1 an 1 hiver (1/10 à 31/1)	20	--

* Ces valeurs limites sont en vigueur à partir du 01/01/2005
** En territoires ruraux : 2 ans après l'entrée en vigueur de la directive, stations représentatives de 1000 km².
A noter que le seuil d'alarme est fixé à 500 µg/m3 durant 3 heures consécutives.
Concernant le Fluor, l'UE ne dispose pas de valeurs normes actuellement.

4. Comparaison des différentes réglementations

Nous nous intéresserons aux deux paramètres concernés par notre projet, à savoir le Fluor et le SO_2.

Fluor

Concernant le Fluor, seule l'OMS à proposée une valeur guide de bien être de 1 µg/m3, et des valeurs guides de santé comprise entre 0,5 et 3 µg/m3. Ce sont ces valeurs qui seront retenues pour l'évaluation des rejets de Fluor de la future unité.

SO2

Polluant	Type de moyenne	Tunisie		OMS (1999)	UE
		Valeur limite santé publique	Valeur guide bien être		
SO_2	Moy. annuelle	0.030 ppm (80 µg/m^3)	0.019 ppm (50 µg/m^3)	50 µg/m^3	20 µg/m^3 5écosystème°
	24 heures	0.12 ppm (365 µg/m^3)	0.041 ppm (125 µg/m^3)	125 µg/m^3	125 µg/m^3
	3 heures	0.50 ppm (1300 µg/m^3)	néant	-	-
	1 heures	-	-	-	350 µg/m^3

La norme tunisienne indique comme valeurs guide de bien être les mêmes valeurs que celles de l'OMS, pour les moyennes annuelles et journalières, et les mêmes que celles de l'UE pour les valeurs moyennes de 24 h.

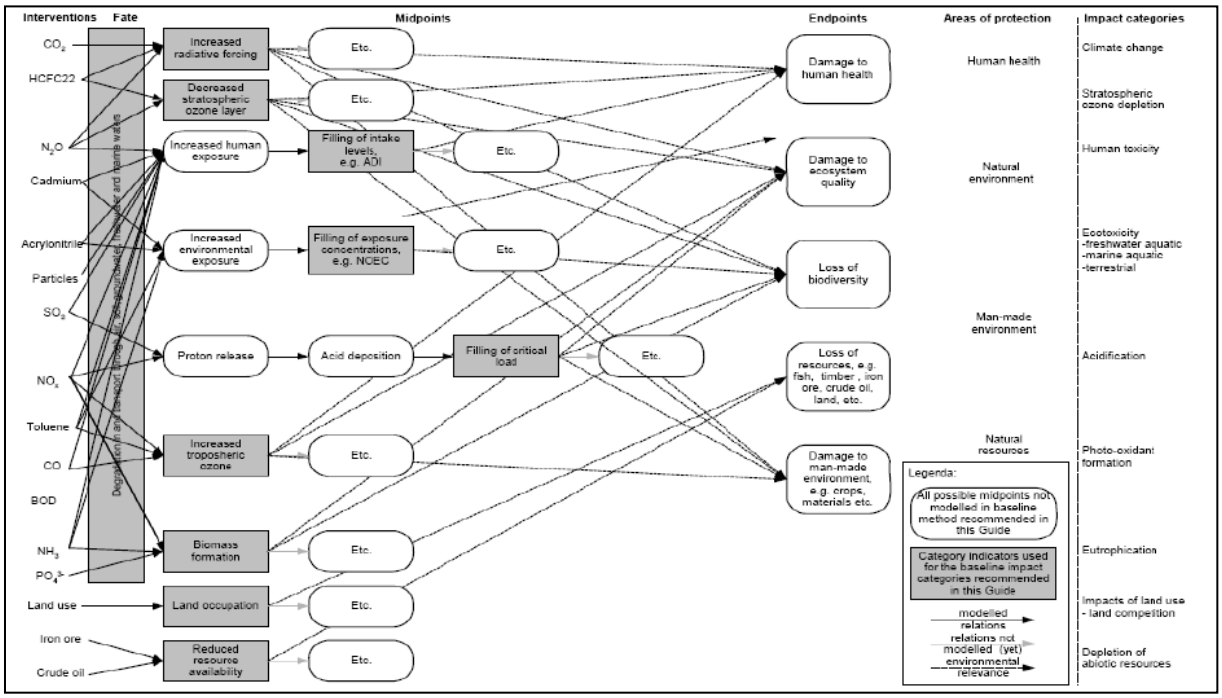
Mais cette norme indique également des valeurs limites de santé publique, qui sont moins exigeantes.

Le projet étant réalisé en Tunisie, nous nous devons de respecter les valeurs contraignantes de la norme NT 106-04 (valeurs limites de santé publique), bien qu'elles soient plus tolérantes que les valeurs guides de l'OMS ou celles de l'UE.

La Méthode CML 2001 et principaux indicateurs environnementaux

1. Méthode CML 2001

En 2001, un groupe de scientifiques sous la direction de CML (centre de sciences de l'environnement de Leiden) a proposé une série de catégorie d'impacts et les méthodes de caractérisation pour l'étape de l'évaluation de l'impact.
Selon le guide de la méthode présenté en 2002, la méthode CML est basée sur une approche mid-points qui englobe l'ensemble des émissions et des ressources, les impacts liés pour lesquelles les méthodes de caractérisation pratique et acceptable sont disponibles. Pour la plupart des catégories d'impacts, les références et les listes complètes de caractérisation ainsi que les facteurs de normalisation sont fournis.
Pour les deux critères : écotoxicité et toxicité humaine, ils s'inspirent des travaux présentés par Huijbregts.
Ainsi, le manuel de la méthode fournit des facteurs de caractérisation pour plus de 1500 différents résultats.
Nous présentons dans la figure suivante les différentes catégories d'impacts évaluées dans la méthode CML 2001.



2. Principaux indicateurs environnementaux

- **Potentiel de réchauffement global :** est une estimation de la façon dont une masse donnée de gaz à effet de serre contribue au réchauffement climatique.

- **Potentiel d'acidification :** est l'augmentation de la quantité de substances acides dans l'atmosphère.
- **Potentiel de création d'ozone photochimique** : (ou POCP) très souvent défini comme le brouillard d'été, est le résultat de réactions qui ont lieu entre les oxydes d'azote NOx et les composés organiques volatils (COV) exposés à des radiations UV.
- **Potentiel de toxicité humaine** : exprime le danger potentiel des produits chimiques rejetés dans l'environnement. HTP comprend à la fois la toxicité intrinsèque et la relation générique sources-à-dose pour les émissions de polluants.
- **Potentiel d'eutrophisation :** est défini comme le potentiel d'un apport excessif en éléments nutritifs susceptibles de provoquer le phénomène d'eutrophisation.

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES

Le travail de cette thèse a aboutit aux publications scientifiques suivantes :

1. Articles

[A1] Hichem HASSINE, Maher BARKALLAH, Alain BELLACICCO, Jamel LOUATI, Alain RIVIERE and Mohamed HADDAR, Multi objectives optimization for sustainable manufacturing. Application in turning, *International Journal of Simulation Modelling*. Vol.14, No1, pp 98-110. [2015]

2. Communications

[C1] Hichem HASSINE, Alain BELLACICCO, Maher BARKALLAH, Jamel LOUATI, Alain RIVIERE and Mohamed HADDAR, Analyse de cycle de vie et application de la méthode bilan carbone pour une chaîne de production : application pour la chaîne de production de l'acide phosphorique, 5ème congrès International Conception et Modélisation des Systèmes Mécaniques, *CMSM'2013,25-27 Mars, Djerba (Tunisie)*

[C2] Hichem HASSINE, Maher BARKALLAH, Alain BELLACICCO, Jamel LOUATI, Alain RIVIERE and Mohamed HADDAR, Optimization of cutting parameters in end milling process based particle swarm optimization tool, *JSM 2014, 17-19 Mars Mahdia (Tunisie)*

[C3] M. BARKALLAH, H.HASSINE, A. BELLACICCO, J. LOUATI, A. RIVIERE and M. HADDAR, "Sustainable manufacturing: modeling and optimization at the production of sulfuric acid", MMSSD 2014, 17-19 Décembre, Sousse- Tunisie

Résumé:

Cette thèse se focalise sur la proposition et l'application des approches pour la modélisation de l'éco-fabrication. Ces approches permettent de préparer et simuler une démarche de fabrication des produits en assurant le couplage entre les objectifs écologiques et économiques.
Les approches développées dans cette thèse sont basées sur les notions d'aide à la décision ainsi que l'optimisation multi objectifs. L'aide à la décision permet l'intervention en deux différents niveaux : le choix des impacts environnementaux à quantifier ainsi que le choix du scénario final de fabrication. Pour l'optimisation multi objectifs, elle assure le couplage entre les deux piliers principaux de l'éco-fabrication : l'écologie et l'économie. Au niveau de l'aide à la décision multi critères, les méthodes Evamix et Promethee ont été appliqués, tandis que les essaims particulaires ont été développés dans le cadre de l'optimisation multi objectifs.
Ces approches ont été appliquées tout d'abord aux quelques opérations d'usinage : tournage et fraisage. Finalement, la chaîne de fabrication de l'acide phosphorique ainsi que celle d'acide sulfurique ont été le sujet de l'application des deux approches développées.

Mots clés: Eco-fabrication, Optimisation multi objectifs, Aide à la décision multi critères, Essaim particulaires, Evamix, Promethee

Abstract:

This thesis focuses on the proposal and implementation of approaches for modeling sustainable manufacturing. These approaches are used to prepare and simulate a process of manufacturing products providing coupling between environmental and economic objectives.
The approaches developed in this thesis are based on the concepts of decision support as well as multi-objective optimization. The decision support allows intervention in two different levels: the choice of indicator to quantify the environmental impacts and the choice of the final manufacturing scenario. For multi-objective optimization, it provides the coupling between the two main pillars of sustainable manufacturing: ecology and economy. In terms of multi criteria decision aid methods, Evamix and Promethee were applied, while particulate swarms were developed as part of the multi-objective optimization.
These approaches have been applied initially to some machining operations: turning and milling. Finally, the production line of phosphoric acid and sulfuric acid were the subject of application of the two approaches developed.

Key word: Sustainable manufacturing, multi objective optimization, multi criteria decision aid, particle swarm, Evamix, Promethee