

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Université Badji Mokhtar-Annaba-

Badji Mokhtar-Annaba-University



جامعة باجي مختار-عنابة-

Année: 2015

Faculté des Sciences de la Terre
Département des Mines

THESE

Pour obtenir le diplôme de
Docteur 3^{ème} Cycle

Domaine : Sciences et Technologies

**ANALYSE ENTRÉE-SORTIE DES DÉCHETS :
ANALYSE DE CYCLE DE VIE DES FERTILISANTS
PRODUITS EN ALGÉRIE**

Filière : Mines

Intitulé du Doctorat : Management de l'Environnement et Contrôle des Terrains

Option : Management de l'Environnement

Préparée par

Ali MAKHLOUF

JURY

Président : Med Laid BOUKELLOUL

Rapporteur : Tayeb SERRADJ

Examineurs : Khodir MADANI

Mohamed CHETTIBI

Khaled BRAHAMIA

Gaétana QUARANTA

Pr. Université BADJI Mokhtar-Annaba.

Pr. Université BADJI Mokhtar-Annaba.

Pr. Université Abderrahmane Mira-Bejaia.

MCA. Université BADJI Mokhtar-Annaba.

MCA. Université BADJI Mokhtar-Annaba.

MCA. Université de Strasbourg, France.

« Il n'y a de vent favorable que pour celui qu'il sait où il va ! »

(Sénèque)

Remerciement

Au terme de ce travail,

Je tiens tous d'abord, à remercier mon Dieu Tout-Puissant qui m'a donné le courage, la sagesse et la patience pour terminer ce travail. Dans ses mots sacrés, je trouve toujours l'envie de continuer. « *Celui qui n'a pas remercié les gens, n'avait pas remercié dieu* », à cet égard :

Je tiens à exprimer mes plus sincères remerciements d'abord à mon directeur de thèse le *Pr. Tayeb SERRADJ* qui a dirigé ce travail, pour la confiance qu'il m'a accordé, ses orientations, ses conseils, et sa disponibilité ainsi que pour tout l'aide qu'il m'a apporté.

Je remercie le *Dr. Khaled Brahamia* pour ses conseils, son accessibilité et surtout pour son amitié, je serai à jamais reconnaissant.

J'exprime également ma gratitude au *Pr. Med-Laid BOUKELLOUL* pour m'avoir fait l'honneur d'accepter la présidence du jury, je lui en suis profondément reconnaissant.

Mes remerciements s'adressent également au *Dr. M. CHETTIBI*, pour m'avoir fait l'honneur d'être membre du jury et d'avoir accepté d'examiner cette thèse.

J'exprime ma vive reconnaissance au *Dr. Tania QUARANTA* de m'avoir accueilli dans son laboratoire, pour ses orientations et ses conseils, et surtout d'avoir acceptée de juger ce travail et de nous honorer avec sa présence.

Mes remerciements s'adressent également au *Pr. MADANI* à l'université de Bejaia, pour l'intérêt qu'il a apporté à ce travail en acceptant de faire partie de mon jury.

Je tiens à remercier le Doyen de notre faculté *Pr. KHERICI* ainsi que le Vice-Doyen *Dr. LARABA* pour leur soutien et leurs encouragements, ils ont cru en nous, et à nous de les remercier. Je remercie également le personnel de la Faculté des Sciences de la Terre sans exception, enseignants et administrateurs, pour tous les services qu'ils nous ont rendus.

J'exprime toute ma gratitude au personnel de l'entreprise « Fertial-Annaba » et de l'entreprise « SomiPhos », pour l'accueil et l'hospitalité durant l'année 2011, notamment pour l'accueil chaleureux qu'ils m'ont réservé ; merci du fond du cœur.

Dédicace

Je tiens à dédier ce modeste travail :

À la femme qui m'a portée, m'a élevée et m'a toujours poussée en avant. À toi maman je reviens aujourd'hui et je porte mon doctorat. Que dieu te bénisse, toi source de tendresse.

À l'homme qui m'a servi de modèle, qui m'a appris d'être un homme avant tout, et d'aimer mon pays malgré tout. Si seulement je pourrais être l'homme que vous êtes.

À mes frères et sœurs Abla, Wissem, Ammar, Ahlem et Azzedine, dieu vous protège. Sans vous je ne serais jamais ici. À toi Hamza, tu es le frère que ma mère n'a pas donnée naissance.

À mes chers neveux. Awel, le leader de son temps, Lamis « la sirène », et mes petits papillons Nouha et Noor. À Lina, Salsabil, Anseme, Majdou, A. Badii et Mohamed. À toi Samsouma, tu es l'âme qui habite mon corps, et le sang qui courent dans mes veines.

À la femme qui m'a toujours soutenue, qui a toujours cru en moi. À la femme qui a honoré mon nom en acceptant d'être un jour appelée Mme : Rima Ghazali Makhlouf. Mon BulBul a chanté une chanson...

À ma grande famille, à mes voisins et mes amis Un par Un. À tous ceux qui ont aimé, aidé ou seulement connu Ali.

Dr. Liman le kotamien...

Résumé

Dans ce travail, une étude détaillée pour déterminer le niveau de consommation d'énergie et les différents impacts environnementaux liés au secteur de production des fertilisants en Algérie a été réalisée. Une analyse des différentes entrées et sorties aux processus pour déterminer les différentes sources de pollution tout au long de cycle de vie des fertilisants a été utilisée. Six produits ont fait l'objet de cette étude ; deux à base de phosphate, SSP et TSP ; deux à base d'azote, CAN 27% N et Sulfazot ; et deux composés, NPKs 3x15 et NPKch 3x15.

Pour l'évaluation des impacts environnementaux liés au secteur de production des fertilisants, l'Analyse de Cycle de Vie a été utilisée. Les impacts étudiés sont : le réchauffement climatique, l'acidification, l'eutrophisation et l'utilisation des ressources. L'évaluation d'impact a été réalisée par l'utilisation du logiciel GEMIS 4.7.

Les principaux résultats ont montrés que les procédés de production des fertilisants consomment des quantités importantes d'énergies fossiles et génèrent principalement des gaz à effet de serre. Le Sulfazot est le plus grand générateur des GES par 8,64 t CO₂ eq. L'unité d'ammoniac consomme 78% de la quantité totale du gaz naturel utilisé dans l'entreprise. La production d'une tonne d'ammoniac génère 1,44 t CO₂ eq.

Mot-clé : Algérie, ACV, Ammoniac, Fertial-Annaba, Fertilisant

Abstract:

In this research, a detailed study for energy consumption levels evaluation and environmental impacts assessment in the fertilizers production sector in Algeria was achieved. An analysis of the various inputs and outputs to the process to identify different sources of pollution throughout the life cycle of fertilizer was used. Six products are making the subject in this study; two phosphate-based, SSP and TSP; two nitrogen-based, CAN 27% N and Sulfazot; and two compounds fertilizers, NPKs 3x15 and NPKch 3x15.

The flows of material and energy for each phase of the life cycle were counted and the associated environmental problems were identified. The analysis was conducted according to the LCA standards ISO 14040 series. The impacts categories studied are Global Warming Potential, Acidification Potential, Tropospheric Ozone Precursor Potential, and Resources use. Evaluation of the impact was achieved using GEMIS 4.7 software.

The results show that Cumulative Energies Requirement and GHG emission in Algerian fertilizers production process are significant. Sulfazot is the most GHG emitter by 8.64 t CO₂ eq. Ammonia plant use 78% of total natural gas that is consumed by Fertial-Annaba. Production of one ton of ammonia requires 51.94 GJ and generates 1.44 t CO₂ eq.

Keywords: Algeria, Ammonia, Fertial-Annaba, Fertiliser, LCA

ملخص

في هذا البحث، تم انجاز دراسة مفصلة من أجل تحديد مستويات استهلاك الطاقة، وتقييم الآثار السلبية على البيئية المرتبطة بقطاع صناعة الأسمدة في الجزائر. حتى نبلغ أهداف الدراسة، قمنا بتحليل كل العناصر الداخلة والخارجة من سلسلة التصنيع وذلك من أجل تحديد مصادر التلوث على طول دورة حياة مختلف الأسمدة التي كانت موضوع الدراسة. في هذه الدراسة، ستة أنواع من الأسمدة درست وهي، اثنان أسمدة آزوتية بسيطة، اثنان أسمدة فسفاطية بسيطة، وسامدان مركبان وهما من صيغة "NPK".

من أجل تقييم الآثار المرتبطة بقطاع صناعة الأسمدة، قمنا باختيار واستعمال طريقة التقييم البيئي المسماة "تحليل مسار الحياة". الآثار البيئية المدروسة هي: الاحتباس الحراري، التحمض، تكون الأوزون التروبوسفوري الضار، وأخيرا استنزاف الموارد الطبيعية. تقييم الآثار البيئية في هذه الدراسة تم بواسطة البرنامج المسمى "GEMIS" (نموذج الانبعاثات العالمية للأنظمة المدمجة) في طبعته 4,7.

أكم النتائج تشير إلى أن قطاع صناعة الأسمدة يتطلب كميات كبيرة من الطاقة غير المتجددة ويسبب انبعاث كميات كبيرة من الغازات الدفيئة. السماد الأزوتي المسمى "Sulfazot" يملك أكبر حصة من الغازات المنبعثة ب 8.64 طن من ثاني أكسيد الكربون المكافئ للطن الواحد المنتج. وحدة إنتاج الأمونيا تستهلك 78% من الطاقة الإجمالية المستعملة في مركب إنتاج الأسمدة والمواد الكيميائية المسمى "فرتيال عنابه". إنتاج طن واحد من الأمونيا يتطلب استهلاك 51 جيجا جول من الطاقة المتمثلة أساسا في الغاز الطبيعي ويسبب انبعاث 1.44 طن من ثاني أكسيد الكربون المكافئ.

كلمات مفتاحية: الجزائر، الأمونيا، الأسمدة، فرتيال-عنابه، تحليل مسار الحياة.

Liste des acronymes

Abréviation	Définition
ACV	Analyse de Cycle de Vie
AE	Aspects Environnementaux
AES	Analyse Entrée-Sortie
AES	Aspects Environnementaux Significatifs
AFNOR	Agence Française de Normalisation
CAN	Calcium Ammonium Nitrate
CCLS	Coopérative de Céréales et de Légumes Secs
CML	Centre of Environmental Science
CNDG	Centre National de Dispatching de Gaz
COVNM	Composés Organiques Volatils Non Méthane
CSST	Commission française de la Santé et de la Sécurité du Travail
DALY	Disability Adjusted Life Years
DAP	Diammoniac Phosphate
DD	Développement Durable
DEC	Demande d'Energie Cumulée
DMC	Demande de Matériaux Cumulée
EDA	Etude de Danger
EDE	Etude de Déchet
EDIP	Environmental Design of Industrial Products
EFMA	European Fertilizer Manufacturers' Association
EIE	Etude d'Impact sur l'Environnement
ELU	Environmental Load Unit
EPFL	Swiss Federal Institute of Technology Lausanne
EPS	Environmental Priority Strategies
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
GES	Gaz à Effet de Serre
ICV	Inventaire du Cycle de Vie
IEA	International Energy Agency
IFA	International Fertilisers Industry Association
INRS	Institut Nationale française de Recherche et de Sécurité
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IPI	International Potash Institute
IPNI	International Planet Nutrition Institute
IRIS	Integrated Risk Information System
ISO	International Standard Organisation
KCl	Chlorure de Potassium
MAAF	Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt

MAP	Monoammoniac Phosphate
MATE	Ministère d'Aménagement du Territoire et de l'Environnement
MPP	Module Processing Plant
MTD	Meilleurs Techniques Disponibles
OCI	Orascom Construction et Industrie
PA	Potentiel d'Acidification
PCI	Pouvoir Calorifique Inferieur
PIB	Produit Intérieur Brut
PNDA	Programme National de Développement de l'Agriculture
PPOT	Potentiel Précurseur d'Ozone Troposphérique
PRAR	Politique de Renouveau Agricole et Rural
PRC	Potentiel de Réchauffement Climatique
RC	Réchauffement Climatique
SAIC	Scientific Applications International Corporation
SBC	Station Boosting Center
SCF	Société Chimique de France
SCLCI	Suisse Center for Life Cycle Inventory
SETAC	Society of Environmental Toxicology and Chemistry
SME	Système de Management Environnemental
SONATRACH	Société Nationale pour la Recherche, la Production, le Transport, la Transformation, et la Commercialisation des Hydrocarbures
SRGA	Station de Récupération des Gaz Associés
SSP	Super Simple Phosphate
TRACI	Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts
TSP	Triple Super Phosphate
UAN	Urée Ammonium Nitrate
UCC	Union des Coopératives des Céréales
UE	Union Européen
UF	Unité Fonctionnelle
UNIFA	Union des Industries de la Fertilisation

Table des matières

Remerciement	i
Dédicace	ii
Résumé.....	iii
Abstract:	iv
ملخص.....	v
Liste des acronymes	vi
Table des matières	viii
Listes des tableaux	xvi
Liste des figures	xviii
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 L'INDUSTRIE DES FERTILISANTS : ÉTAT ET PERSPECTIVES	
1. Historique.....	7
2. Définitions.....	9
2.1. Définition des fertilisants	9
2.2. L'élément azote	10
2.3. L'élément phosphore.....	10
2.4. L'élément potassium	10
3. Présentation générale de la filière de production des fertilisants	11
3.1. Les fertilisants azotés	13
3.1.1. L'Ammoniac, matière première des fertilisants azotés	13
3.1.2. L'Acide nitrique	16
3.1.3. L'Urée	17
3.1.4. Ammonium Nitrate et Calcium Ammonium Nitrate.....	18
3.2. Les fertilisants Phosphatés	18
3.2.1. Le phosphate matière première des fertilisants phosphatés.....	18
3.2.2. L'acide phosphorique	19

3.2.2.1. Procédés de production	20
3.2.3. Phosphate Diammoniac et Phosphate Monoammoniac.....	21
3.2.4. Triple Superphosphate et Super Simple Phosphate	22
3.3. Les fertilisants Potassiques.....	22
3.3.1. Le potassium matière première des fertilisants potassiques	22
3.3.1. Chlorure de potassium.....	23
3.3.1.1. Procédé thermique (par dissolution puis cristallisation).....	24
3.3.1.2. Procédé humide (Par flottation).....	24
3.3.2. Sulfate de potassium.....	25
3.4. Les fertilisants composés	25
4. Le secteur de production des fertilisants en Algérie	25
4.1. Historique et perspective	25
4.2. Principaux acteurs dans le secteur.....	26
5. Présentation du complexe FERTIAL-Annaba	27
5.1. Présentation générale.....	27
5.2. Localisation de l'usine	27
5.3. Les activités de Fertial-Annaba.....	29
5.3.1. Unité d'ammoniac	30
5.3.2. Unité acide nitrique	31
5.3.3. Unité nitrate d'ammonium	31
5.3.4. Unité SSP	31
5.3.5. Unité NPK	31
5.3.6. Unité UAN	32
5.3.7. Centrale utilité II (CU II).....	32
5.4. Commercialisation et distribution	32
5.4.1. Commercialisation.....	32
5.4.2. Distribution des produits Fertial-Annaba (FERTIAL, 2014)	33
5.4.1.1. Asfertrade	33
5.4.1.2. CCLS et UCC.....	33
CHAPITRE 2 ANALYSE DE CYCLE DE VIE : OUTIL D'ÉVALUATION DES	
PERFORMANCES ENVIRONNEMENTALES	
1. Historique de l'ACV	34
2. Définition et applications de l'ACV.....	36

2.1. Définition	36
2.2. Utilisation de l'ACV	37
2.3. Avantages de l'ACV	37
2.4. Limites de l'ACV	38
2.4.1. Limites méthodologiques	38
2.4.2. Limites liées aux données.....	38
3. Méthodologie de l'ACV	38
3.1. Typologie d'ACV.....	39
4. La réalisation d'une ACV	39
4.1. Définition des objectifs et du champ d'étude.....	40
4.1.1. Objectifs de l'étude	40
4.1.2. Le champ d'étude	41
4.1.3. L'unité fonctionnelle.....	42
4.2. Inventaire de cycle de vie (ICV)	43
4.2.1. Qualité des données.....	44
4.3. L'évaluation des impacts environnementaux	44
4.3.1. Choix des catégories d'impact.....	46
4.3.2. Classification	46
4.3.3. Caractérisation.....	46
4.4. Interprétation des résultats	48
5. Les catégories d'impact.....	48
5.1. Utilisation des ressources	48
5.1.1. Demande d'Energie Cumulée (DEC).....	49
5.1.2. Demande des Matériaux Cumulé (DMC).....	49
5.2. Le Potentiel de Réchauffement Global (PRC)	49
5.3. Le Potentiel d'Acidification (PA)	49
5.4. Le Potentiel Précurseur d'Ozone Troposphérique (PPOT).....	49
6. Les méthodes d'évaluation d'impact dans l'ACV	50
6.1. La méthode : Impact 2002+	50
6.2. La méthode : CML	51
6.3. La méthode : Eco-Indicator 95 et 99.....	51
6.4. La méthode : EDIP	52
6.5. La méthode EPS	52

6.6. La méthode TRACI.....	53
7. Les bases de données.....	53
7.1. Ecoinvent.....	53
7.2. BUWAL 250	54
7.3. US-IE.....	54
7.4. US LCI	54
8. Les logiciels d'ACV	55
8.1. GEMIS	55
8.2. SimaPro	55
8.3. TEAM TM	56
8.4. GABI	56
8.5. CMLCA.....	57
8.6. ECOLAB	57
8.7. ECOPRO	57
8.8. PEMS	58
8.9. UMBERTO	58

CHAPITRE 3 ANALYSE DE CYCLE DE VIE DES FERTILISANTS AZOTÉS

1. Objectif et champ d'étude	60
1.1. Objectif de l'étude.....	60
1.2. Champ d'étude est frontière de système	60
1.3. L'unité fonctionnelle	62
2. Analyse de l'inventaire.....	62
2.1. Qualité des données.....	62
2.2. Description du système de production des fertilisants azotés.....	63
2.2.1. Phase d'extraction du gaz naturel.....	63
2.2.1.1. Station de Récupération des Gaz Associés (SRGA)	64
2.2.1.2. Station Boosting Center (SBC)	64
2.2.1.3. Module Processing Plant (MPP)	65
2.2.2. Phase de transport du gaz naturel	66
2.2.3. Phase de production des fertilisants azotés	67
2.2.3.1. Production de l'ammoniac.....	67
2.2.3.2. Production de l'acide nitrique	72

2.2.3.3. Production de nitrate d'ammonium (ammonitrate)	76
2.2.3.4. Production de calcium ammonium nitrate (CAN).....	79
2.2.3.5. Production de Sulfazot (26%N + 36% SO ₃).....	81
2.3. Bilan quantitatif et qualitatif des entrées	84
2.3.1. Bilan d'entrée pour la phase d'extraction du gaz naturel	84
2.3.1.1. Bilan d'entrée de l'unité SRGA	84
2.3.1.2. Bilan d'entrée de l'unité SBC.....	85
2.3.1.3. Bilan d'entrée de l'unité MPP-0.....	85
2.3.2. Bilan d'entrée pour la phase de transport du gaz naturel	85
2.3.3. Bilan d'entrée pour la phase de production des fertilisants	86
2.3.3.1. Bilan d'entrée de l'unité de production de l'ammoniac	86
2.3.3.2. Bilan d'entrée de l'unité de production de l'acide nitrique	86
2.3.3.3. Bilan d'entrée de l'unité de production CAN.....	87
2.3.3.4. Bilan d'entrée de l'unité de production des fertilisants : fonction Sulfazot	87

CHAPITRE 4 ANALYSE DE CYCLE DE VIE DES FERTILISANTS PHOSPHATÉS

1. Objectif et champ d'étude	89
1.1. Objectif de l'étude.....	89
1.2. Champ d'étude est frontière de système	90
1.3. L'unité fonctionnelle	92
2. Analyse de l'inventaire.....	92
2.1. Qualité des données.....	92
2.2. Description du système de production des fertilisants phosphatés	93
2.2.1. Phase d'extraction de phosphate	93
2.2.1.1. Extraction du phosphate brut.....	94
2.2.1.2. Préparation du phosphate brut.....	95
2.2.1.3. Traitement du phosphate	97
2.2.2. Phase de transport du phosphate.....	101
2.2.3. Phase de production des fertilisants	101
2.2.3.1. Production du Triple Superphosphate (TSP).....	102
2.2.3.2. Production du Super Simple phosphate (SSP)	102
2.2.3.3. Production des fertilisants mixtes NPKch et NPKs.....	103
2.2.3.4. Production de la vapeur haute pression	103
2.3. Bilan quantitatif et qualitatif des entrées	104

2.3.1. Bilan d'entrée pour la phase d'extraction du phosphate.....	104
2.3.2. Bilan d'entrée pour la phase de transport du phosphate.....	105
2.3.3. Bilan d'entrée pour la phase de production des fertilisants.....	105
2.3.3.1. Bilan d'entrée de l'unité de production de TSP.....	105
2.3.3.2. Bilan d'entrée de l'unité de production de SSP.....	106
2.3.3.3. Bilan d'entrée de l'unité de production de NPKs 3x15.....	106
2.3.3.4. Bilan d'entrée de l'unité de production de NPKch 3x15.....	106
2.3.3.5. Bilan d'entrée de la Centrale Utilitaire II.....	107

CHAPITRE 5 ÉVALUATION DE L'IMPACT ET INTERPRETATION DES RÉSULTATS

1. Évaluation des impacts liés à la production des fertilisants.....	108
1.1. Méthode de travail.....	109
1.2. Démarche d'évaluation d'impact.....	110
2. Interprétation des résultats.....	111
2.1. Ammoniac.....	111
2.1.1. Potentiel de réchauffement climatiques.....	111
2.1.2. Potentiel d'acidification.....	112
2.1.3. Potentiel précurseur d'ozone troposphérique.....	112
2.1.4. Utilisation des ressources.....	113
2.2. Acide nitrique.....	114
2.2.1. Potentiel de réchauffement climatiques.....	114
2.2.2. Potentiel d'acidification.....	114
2.2.3. Potentiel précurseur d'ozone troposphérique.....	115
2.2.4. Utilisation des ressources.....	115
2.3. Calcium Ammonium Nitrate « CAN ».....	116
2.3.1. Potentiel de réchauffement climatiques.....	116
2.3.2. Potentiel d'acidification.....	116
2.3.3. Potentiel précurseur d'ozone troposphérique.....	117
2.3.4. Utilisation des ressources.....	117
2.4. SULFAZOT.....	118
2.4.1. Potentiel de réchauffement climatique.....	118
2.4.2. Potentiel d'acidification.....	118
2.4.3. Potentiel précurseur d'ozone troposphérique.....	119
2.4.4. Utilisation des ressources.....	119

2.5. Triple Super Phosphate « TSP »	120
2.5.1. Potentiel de réchauffement climatiques.....	120
2.5.2. Potentiel d'acidification	120
2.5.3. Potentiel précurseur d'ozone troposphérique	121
2.5.4. Utilisation des ressources	122
2.6. Super Simple Phosphate « SSP »	122
2.6.1. Potentiel de réchauffement climatiques.....	122
2.6.2. Potentiel d'acidification	123
2.6.3. Potentiel précurseur d'ozone troposphérique	123
2.6.4. Utilisation des ressources	124
2.7. Fertilisant mixte « NPK 15x3ch ».....	124
2.7.1. Potentiel de réchauffement climatiques.....	124
2.7.2. Potentiel d'acidification	125
2.7.3. Potentiel précurseur d'ozone troposphérique	126
2.7.4. Utilisation des ressources	127
2.8. Fertilisant mixte « NPK 15x3s».....	127
2.8.1. Potentiel de réchauffement climatique	127
2.8.2. Potentiel d'acidification	128
2.8.3. Potentiel précurseur d'Ozone Troposphérique.....	128
2.8.4. Utilisation des ressources	129
3. Comparaison et discussion des résultats	130
3.1. L'ammoniac	130
3.1.1. Utilisation des ressources	130
3.1.2. L'émission des GES	131
3.2. Acide nitrique.....	132
3.2.1. L'émission des GES pour l'acide nitrique.....	132
3.3. Calcium Ammonium Nitrate	133
3.3.1. Utilisation des ressources	133
3.3.1. L'émission des GES	133
3.4. TSP et SSP	134
3.4.1. Utilisation des ressources	134
3.4.2. L'émission des GES	134
3.5. NPKs et NPKch.....	135

3.5.1. Utilisation des ressources	135
3.5.2. Emission des GES	135
CONCLUSION GENERALE	136
Références bibliographiques	138
Les Annexes	150
Annexe 1 : Manuel d'utilisation de GEMIS 4.7.....	150
Annexe 2 : Tableaux des émissions détaillées	158
Annexe 3 : Figures des scénarios d'émission pour les fertilisants	162

Listes des tableaux

Tableau 1. Les parts des différents carburants utilisés pour la production d'ammoniac.....	15
Tableau 2. Principaux producteurs de phosphate dans le monde.....	19
Tableau 3. Statistiques du marché mondial de l'acide phosphorique.	20
Tableau 4. Statistiques du marché mondial du Triple Superphosphate.	22
Tableau 5. Statistiques du marché mondial du Triple Superphosphate.	23
Tableau 6. Principaux produits fournis par les unités de production de FERTIAL-Annaba..	29
Tableau 7. Caractéristiques techniques des produits objets de l'étude	30
Tableau 8. Statistiques des ventes de Fertial-Annaba.....	32
Tableau 9. Les facteurs d'émission pour chaque catégorie d'impact	50
Tableau 10. Présentation du sous-système : extraction de gaz naturel	64
Tableau 11. Présentation du sous-système : production des fertilisants azotés	67
Tableau 12. Bilan d'entrée de l'unité SRGA	84
Tableau 13. Bilan d'entrée de l'unité SBC	85
Tableau 14. Bilan d'entrée de l'unité MPP-0.....	85
Tableau 15. Bilan d'entrée pour le sous-système : transport de gaz naturel.....	86
Tableau 16. Bilan annuel des entrées aux principales unités de production de Fertial	86
Tableau 17. Bilan d'entrée pour l'Unité Ammoniac.....	86
Tableau 18. Bilan d'entrée pour l'Unité Acide Nitrique.....	87
Tableau 19. Bilan d'entrée pour l'Unité Nitrate d'Ammonium	87
Tableau 20. Bilan d'entrée de l'unité de production des fertilisants : fonction de Sulfazot...	87
Tableau 21. Présentation du sous-système : extraction de phosphate.....	94
Tableau 22. Description du sous-système : production des fertilisants phosphatés	101
Tableau 23. Bilan d'entrée pour le sous-système : extraction du phosphate	105
Tableau 24. Bilan d'entrée pour le sous-système : transport du phosphate	105
Tableau 25. Bilan d'entrée pour la production du TSP.....	106
Tableau 26. Bilan d'entrée pour la production du SSP.....	106
Tableau 27. Bilan d'entrée pour la production de NPKs 3x15	106
Tableau 28. Bilan d'entrée pour la production de NPKch 3x15	107

Tableau 29. Bilan d'entrée pour la Centrale Unitaire II.....	107
Tableau 30. Comparaison entre la consommation réelle du gaz naturel et le design	131
Tableau 31. Consommation d'énergie pour la production d'ammoniac.....	131
Tableau 32. Emission des GES pour la production d'une tonne d'ammoniac.....	132
Tableau 33. Emission de N ₂ O de la production d'acide nitrique.....	133
Tableau 34. L'émission des GES pour la production d'une tonne de CAN	133
Tableau 35. Emission des GES pour la production d'une tonne de TSP et SSP	134
Tableau 36. Emission des GES pour la production de NPK.....	135

Liste des figures

Fig. 1. Cap-horniers géants du nitrate dans un port Allemand vers 1900.....	8
Fig. 2. Consommation mondiale des fertilisants minéraux.....	12
Fig. 3. Evolution du marché mondial des fertilisants.	12
Fig. 4. Consommation mondiale des fertilisants minéraux par pays.	13
Fig. 5. Vue d'ensemble des secteurs de fabrication de produits chimiques.	14
Fig. 6. La production des fertilisants azoté à base d'ammoniac.	13
Fig. 7. Répartition de la consommation de l'élément azote par produits	17
Fig. 8. Principe de fabrication des fertilisants phosphatés.....	19
Fig. 9. Répartition de la consommation du phosphate par produits.....	21
Fig. 10. Principe de fabrication des fertilisants potassique.....	23
Fig. 11. Répartition de la consommation de l'élément potassium par produits.	24
Fig. 12. Localisation du complexe « Fertial-Annaba ».....	28
Fig. 13. Plan de masse du complexe Fertial-Annaba.....	29
Fig. 14. Réseau de distribution et de déposé des produits de Fertial-Annaba.....	33
Fig. 15. Principales phases de L'Analyse de cycle de Vie	40
Fig. 16. Exemple simplifié de cycle de vie classique d'un produit	42
Fig. 17. Les différents éléments de la phase d'évaluation des impacts environnementaux.....	45
Fig. 18. Liste des catégories intermédiaires (problème) et catégories finales (dommage).....	47
Fig. 19. Frontière de système de production des fertilisants azotés (Sulfazot & CAN)	61
Fig. 20. Description de champs d'étude (phase d'extraction du gaz naturel)	63
Fig. 21. Transport et distribution du gaz naturel à partir du Champ de Hassi R'mel	66
Fig. 22. Description de procédé de production de l'ammoniac	68
Fig. 23. Description de procédé de production de l'acide nitrique	73
Fig. 24. Description de procédé de production de la solution nitrate	77
Fig. 25. Description de procédé de production de CAN à 27% N.....	79
Fig. 26. Description de procédé de production de Sulfazot.....	82
Fig. 27. Frontière de système de production des fertilisants phosphatés (TSP & SSP).....	90
Fig. 28. Frontière de système de production des fertilisants composés (NPK 3x15 s & ch)..	91

Fig. 29. Carte de situation géographique et géologique des gisements de Djebel Onk.....	93
Fig. 30. Description de procédé de préparation mécanique du phosphate.....	96
Fig. 31. Description de procédé de traitement du phosphate par voie humide	98
Fig. 32. Description de procédé de traitement du phosphate par voie sèche	100
Fig. 33. Description de procédé de production de TSP	102
Fig. 34. Présentation graphique de l'arbre de procédé de production du NPK 3x15ch.....	110
Fig. 35. Les facteurs d'émission dans les catégories d'impact dans le procédé d'ammoniac	112
Fig. 36. La contribution de chaque substance dans les phases cycle de vie d'ammoniac	112
Fig. 37. Description de la Demande d'énergie cumulée pour le cycle de vie d'ammoniac...	114
Fig. 38. Les facteurs d'émission dans le procédé d'acide nitrique	115
Fig. 39. La contribution des substances dans les différentes phases cycle de vie d'HNO ₃ ...	115
Fig. 40. Les facteurs d'émission dans les catégories d'impact dans le procédé de CAN	117
Fig. 41. La contribution des substances dans les différentes phases cycle de vie de CAN ...	117
Fig. 42. Les facteurs d'émission dans les catégories d'impact dans le procédé de Sulfazot .	119
Fig. 43. La contribution des substances dans les différentes phases de vie de Sulfazot.....	119
Fig. 44. Les facteurs d'émission dans les catégories d'impact dans le procédé de TSP.....	121
Fig. 45. La contribution des substances dans les différentes phases cycle de vie de TSP.....	122
Fig. 46. Les facteurs d'émission dans les catégories d'impact dans le procédé de SSP	123
Fig. 47. La contribution des substances dans les différentes phases cycle de SSP.....	124
Fig. 48. Les facteurs d'émission dans les catégories d'impact pour le NPK 3x15ch	126
Fig. 49. La contribution des substances dans les différentes phases de vie de NPK 3x15ch	126
Fig. 50. Les facteurs d'émission dans les catégories d'impact pour le NPK3x15s	128
Fig. 51. La contribution des substances dans les différentes phases cycle de NPK 3x15s....	129

INTRODUCTION

La deuxième moitié du 20^{ème} siècle voit émerger les prémises de profonds changements des espaces et des sociétés. La foi absolue dans les progrès scientifiques et techniques du moment, les crises sociales et énergétiques à répétition, les problématiques de développement (le choix de modèle économique et stratégie de développement), ont poussé certains pays et particulièrement ceux en voie de développement vers des choix de développement industriel qui se sont révélés quelques années plus tard préjudiciables pour la santé publique et l'environnement. Les avantages politiques engrangés en termes d'emploi et moyens financiers (exportation à l'état brut des ressources naturelles) ont longtemps satisfait les pouvoirs publics ce qui a détourné consciemment ou inconsciemment leur regard sur les incidences environnementales. Or les impacts environnementaux liés aux activités industrielles n'ont pas cessé de se multiplier et de se cumuler. Les conséquences écologiques devenaient de plus en plus graves et compliquées à résoudre. Il s'agit entre autres de l'épuisement des ressources naturelles, la contamination des aquifères, la pollution des sols, la dégradation des écosystèmes naturels, du réchauffement climatique et globalement de la dégradation du cadre de vie. Cependant, le réchauffement climatique est le problème qui cristallise les efforts des scientifiques et mobilise les opinions publiques en raison de son fort impact et de son étendue globale, planétaire (dommages écologiques, fonte des glaciers, la remontée des eaux et les sécheresses). Il est clairement établi actuellement que l'activité industrielle est non seulement responsable de la déplétion des ressources naturelles fossiles utilisées comme combustible, mais aussi du réchauffement climatique par l'émission de Gaz à Effet de Serre (GES). Les années 90 marquent un sursaut planétaire, la question environnementale devient une préoccupation mondiale. Elle capte à la fois l'attention, des scientifiques, du grand public dans toutes ces acceptions, et en fin des politiques de toutes les nationalités. Avec la consécration du concept Développement Durable dans le sommet de la terre à Rio, l'apparition de l'agenda 21, la signature de la convention du Kyoto sur la réduction des émissions des GES, la protection de l'environnement et la préservation des milieux naturels est devenue préoccupation impérieuse mondiale.

L'Algérie, signataire des conventions internationales de protection de l'environnement depuis son accession à l'indépendance, s'est inscrite dans le sillage de ce sursaut planétaire en

faveur de la protection de l'environnement et du réchauffement climatique, par la mise à jour de son arsenal juridique et technique. Six textes fondamentaux¹ relatifs à l'aménagement du territoire dans le cadre du développement durable et plus d'une dizaine de textes d'application ont été promulgués pour cerner toutes les questions environnementales. Aussi à la faveur de cette nouvelle réglementation plusieurs méthodes et outils sont utilisés pour l'évaluation de l'impact des activités industrielles sur l'environnement ; les Études d'Impact sur l'Environnement (EIE), les Études de Danger (EDA), les Études de Déchet (EDE), l'Analyse de Cycle de Vie (ACV), et l'Analyse Entrée-Sortie (AES), ces méthodes sont généralement utilisées pour aider à la prise de décision. D'autres méthodes sont utilisées dans la gestion de l'environnement comme le "Système de Management Environnemental" (SME), qui visent à maîtriser l'utilisation d'énergie et réduire la génération des déchets dans les procédés industriels comme les Meilleures Techniques Disponibles (MTD), sont misent au service des producteurs. Par la force de loi, toutes les activités industrielles même celles antérieures à la loi se sont conformées aux impératifs de protection de l'environnement. Elles se sont engagées dans l'application de mesures qui les aident à mieux prendre en compte la notion d'environnement et à maîtriser les Aspects Environnementaux Significatifs (AES) de l'entreprise. C'est justement cet aspect de l'activité industrielle qui capte notre attention. En effet, après 15 années d'effort pour assoir une politique environnementale à la mesure des engagements et des défis internationaux, il était opportun de s'interroger sur l'efficacité des mesures législatives dans l'atténuation des AES. Ces interrogations émanent en réalité des missions du Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (MATE, 2006). De tous les points soulevés (SNAT 2025) celui de la gestion rationnelle des produits chimiques, nous intéresse particulièrement. Cet intérêt que nous portons pour la question des produits chimiques s'est imposé par lui-même pour des raisons ; personnels pédagogiques ; d'histoire économique du pays, sociale et scientifique.

Étant étudiant à l'université d'Annaba j'ai eu à prendre connaissances de la réalité géographique de cette ville et de sa région et prendre conscience des risques aussi bien naturels que technologiques qui la guettent. En effet, Annaba, ville du Nord-est algérien, est

¹ Lois (03-10 Développement durable, 04 20 RISQUE,)

connu par ses atouts naturels (plages, montagne, forêts et plaines, potentielles agraires), mais aussi par son paysage industriel (la sidérurgie et la chimie industrielle). Deux aspects qui ne peuvent échapper à l'observateur même non averti. Le complexe FERTIAL objet de notre intérêt est l'un des monuments industriels de la ville qui force le regard, mais aussi l'attention, car c'est le site qui a le plus fait parlé lui, des années durant, en raison de son fort impact sur la santé publique et la nature de ses produits (les fertilisants) et leur impact sur les sols et les nappes phréatiques.

Aussi, l'exploitation excessive des terres agricoles provoque l'appauvrissement en matières nutritives essentielles pour les végétaux, ce qui provoque à son tour la baisse des rendements des cultures (Savci, 2012). Le Développement démographique, la crise mondiale sur les produits alimentaires notamment les céréales ont forcé le recours aux fertilisants pour augmenter les rendements et répondre aux besoins des populations. Depuis le début des années 1970, et l'application de la révolution agraire (Chabane., 2013). L'emploi de fertilisants s'est considérablement accru. Il était donc une priorité économique des dirigeants de cette période d'introduire et de développer l'industrie des fertilisants. C'est dans ce contexte économique et politique que le complexe « ASMIDAL » représenté par les plates formes de production d'Annaba et d'Oran ont vu le jour. Depuis la mise en service des premières unités de production des fertilisants phosphatés en 1972, les complexes de fertilisants ont connu plusieurs extensions de 1982 à nos jours avec les unités de production des fertilisants azotés (les unités de production d'ammoniac, d'acide nitrique et de nitrate d'ammonium) à Annaba, une grande unité de production d'ammoniac à Oran. Les deux plateformes assuraient à l'Algérie une grande indépendance sur le marché des fertilisants minéraux. ASMIDAL était pour long temps le seul acteur dans ce secteur des fertilisants.

Toutefois, l'utilisation des fertilisants minéraux permet aux plantes de compenser les manques des éléments nutritifs dans le sol et de les introduire dans la chaîne alimentaire, mais le processus de production des fertilisants conduit à une pollution de sol, d'eau et de l'air (Savci, 2012). L'industrie des fertilisants est caractérisée par sa demande importante d'énergie et ses considérables émissions des GES (Wood & Cowie., 2004). La commission européenne estime que la production des fertilisants consomme entre 2 et 3% de l'énergie mondiale (IPPC., 2007), et responsable d'environ 1,2% de l'émission globale des GES (Kongshaug., 1998). Le secteur de production des fertilisants a fait l'objet de plusieurs études à travers le

monde, dont le but était d'évaluer les impacts environnementaux (Patyk, 1996 ; Kongshaug, 1998; Davis et Haglund, 1999 ; DOE, 2000 ; Wood & Cowie., 2004 ; Kool et al., 2012), et les performances énergétiques dans leurs procédés de production (IEA, 2007 ; EFMA, 2007 ; Lako., 2009). La fertilisation a un impact important sur le sol que sur les eaux souterraines (Barros et al., 2012 ; Jie et al., 2013). La salinité des sols (Ammari et al., 2013), l'accumulation de métaux lourds (Gupsa et al., 2014), de l'eutrophisation de l'eau (Smith, 2009), de l'accumulation de nitrate (Luis et al., 2013), et l'émission des GES (Kahrl et al., 2010), sont des impacts engendrés par l'utilisation excessive et non contrôlée des fertilisants (Savci, 2012 ; Xinpeng et al., 2014).

La nécessité sociale d'une production agricole durable et respectueuse de l'environnement, exige l'emploi des moyens et des technologies modernes (Gámez et al., 2012) pour garantir un produit agricole de bonne qualité qui assure un haut rendement, et une protection à un environnement de plus en plus fragile (Jury et al., 2010). L'importance du secteur des fertilisants dans l'économie algérienne locale exige une évaluation de ses performances environnementales. Pour d'abord, déterminer l'efficacité des procédés de production et leurs respects vis-à-vis l'environnement surtout en matière d'émission des GES et d'épuisement des ressources naturelles primaires, et quantifier les émissions atmosphériques qu'ils lui sont liées, pour ensuite déterminer les principales sources de pollution durant le cycle de vie des produits et enfin, déterminer la position du secteur Algérien par rapport aux autres pays du monde.

Pour atteindre notre objectif, il était nécessaire d'effectuer un stage d'imprégnation au niveau du complexe de production des fertilisants « Ferial-Annaba », à l'entreprise d'exploitation et de commercialisation du phosphate « SomiPhos-Tébessa », ainsi qu'au champ d'extraction du gaz naturel de « Hassi R'mel ». Six produits fertilisants ont été l'objet de notre étude, deux sont à base du phosphate : le Super Simple Phosphate (SSP) et le Triple Superphosphate (TSP), deux à base d'azote : le Calcium Ammonium Nitrate (CAN) à 27% d'azote et le Sulfazot, et les deux derniers sont des produits mixtes : NPK 3x15 à base de Chlorure de potassium et le NPK 3x15 à base de Sulfate de potassium. Pendant notre séjour dans les unités de production, une collecte détaillée des données a été réalisée. Cette collecte nous a permis de faire un inventaire exhaustif de toutes les entrées au processus de production étudiés.

L'Analyse Entrée-Sortie (AES) n'est pas seulement un outil d'étude économique, mais aussi un instrument puissant de l'analyse environnementale (Harscoet, 2007), l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) est une méthode d'évaluation environnementale développée pour évaluer les impacts environnementaux générés par un procédé de production ou un service (Guinée et al., 2002). L'ACV, un modèle environnemental d'Entrée-Sortie (Wiaoming and Kraines, 2000) est donc l'outil que nous utiliserons dans ce travail pour l'évaluation des impacts environnementaux de FERTIAL-Annaba. L'avantage de l'ACV réside dans la prise en compte de toutes les entrées (matière première et énergie), et les résidus liquides, solides ou gazeux liés au produit fabriqué tout au long de son cycle de vie « du berceau à la tombe » (Lewandowska et al., 2012). Elle est couramment utilisée pour procéder à une évaluation complète des émissions, ou pour réduire les impacts négatifs sur l'environnement provoqués par le produit (Mongelli et al., 2005). Il s'agit d'une méthode standardisée par l'Organisation Internationale de Standardisation ISO dans la famille ISO 14040. L'ISO 14040:2006 spécifie les principes et le cadre pour la réalisation d'analyses du cycle de vie. À son tour l'ISO 14044:2006 établit les exigences et fournit les lignes directrices pour la réalisation d'une ACV. Cette dernière se compose de quatre phases : la définition des objectifs et du champ de l'étude ; l'inventaire du cycle de vie ; l'évaluation de l'impact du cycle de vie ; et l'interprétation du cycle de vie (Kluppel, 2005 ; ISO, 2006a ; ISO, 2006b ; Finnveden et al., 2009).

Les outils informatiques spécialisés dans l'évaluation de la performance environnementale des produits viennent compléter les concepts pour les rendre opérationnels, il s'agit notamment des bases de données intégrées dont « *Ecoinvent* » est la plus complète et la plus utilisée. L'avantage de l'utilisation des logiciels informatiques spécialisés revient, à la capacité des ces derniers à prendre en considération toutes les entrées et sortie dans le système objet de l'étude. Lors de la création d'un modèle informatique pour la simulation des impacts environnementaux d'un procédé de fabrication d'un produit donné, le logiciel peut prendre en compte l'impact sur l'environnement des processus amont et l'additionner dans le bilan global. Notre but dans ce travail a porté sur l'emploi du logiciel « *Global Emission Model for Integrated Systems* » (GEMIS) conçu pour l'analyse environnementale, l'analyse des couts et de l'utilisation de l'énergie dans les processus de production des matériaux et de transport (GEMIS, 2014).

L'architecture de cette thèse est construite autour de deux parties et globalement de cinq chapitres. La première partie est naturellement consacrée au cadre théorique, le choix de l'approche méthodologique et des outils. Elle est scindée en deux chapitres :

Le premier est consacré aux fertilisants, il présente leur historique ainsi que leurs utilisations, une description des différentes matières premières utilisées dans la production des fertilisants, les différentes techniques et procédés de production des fertilisants, les impacts environnementaux de l'industrie des fertilisants et une présentation détaillée du secteur de production des fertilisants en l'Algérie.

Le deuxième chapitre présente l'historique, la définition de l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) comme outil d'évaluation des performances environnementales et un moyen d'analyse entrée-sortie des matières, d'énergie et des déchets dans les procédés industriels modernes. Il présente la méthodologie. Ensuite, les différentes méthodes d'évaluation d'impacts seront expliquées dans une vision exhaustive. Enfin, un état de l'art des bases de données et des logiciels utilisés dans l'ACV.

La deuxième partie (expérimentale), est à son tour scindée en trois chapitres consacrés à l'analyse de cycle de vie de chaque fertilisant objet de l'étude et des deux principales matières premières (ammoniac + acide nitrique).

Le troisième chapitre est consacré à l'étude des fertilisants azotés. La détermination des objectifs de l'étude, la description de tous les procédés allant de l'extraction du gaz naturel à la production des fertilisants en passant par la production de l'ammoniac, l'acide nitrique et la solution nitrate et l'inventaire des entrées dans toutes les unités de production.

Une ACV de chacun des produits à base de phosphate plus les deux produits mixtes (NPK 3x15) ont fait l'objet du quatrième chapitre.

Le cinquième chapitre est dédié à l'évaluation des impacts sur l'environnement liés à chaque produit étudié. Particulièrement l'identification des différentes entrées et sorties dans les processus de production de fertilisants, la consommation des ressources naturelles primaires utilisées pour la production de chaque produit, et enfin, l'interprétation et la comparaison des principaux résultats d'ACV.

CHAPITRE 1

L'INDUSTRIE DES FERTILISANTS : ÉTAT ET PERSPECTIVES

1. Historique

Depuis que l'homme a commencé l'agriculture, il a été confronté au problème de régénération des sols (histoire, 2013). D'abord, la solution était de changer fréquemment de zone de culture, de brûler les taillis après le défrichage pour apporter à la terre un supplément de matières fertilisantes, de laisser reposer les sols durant des périodes, ou de les fertiliser pour compenser les matières nutritives manquantes dans les sols (Encyclopædia, 2013). Au début du 1^{ère} millénaire avant J.C, l'homme a utilisé les déjections animales et humaines, additionnées ou non de déchets végétaux, de pailles, de chaumes et de terre, pour augmenter la fertilité du sol (Daujat et al., 2014).

Les Égyptiens ont utilisé les riches limons apportés par les crues du Nil pour enrichir et entretenir les sols durant des milliers d'années. Les Babyloniens avaient certaines connaissances de ces pratiques (Historique des engrais, 2014). Les Romains ont perfectionnés des méthodes de fertilisation et ils les ont combinés avec des fertilisants verts pourvoyeurs d'azote tel que le lupin et la fève (Daujat et al., 2014).

Au moyen âge et au début de l'époque moderne, les agriculteurs ramassaient le fumier des bêtes durant les mois d'hiver, pour l'utiliser dans la fertilisation (histoire, 2013). Dans les années 1720 à Zurich en Suisse, un paysan utilise pour la première fois l'urine du bétail écoulant du fumier. À la fin du 18^{ème} siècle, cette méthode de fertilisation était largement répandue dans la région du lac de Zurich (Mattmüller and Ineichen, 2011).

Karl Von Liebig, le jeune chimiste allemand, affirme en 1837 que les plantes se nourrissent des minéraux contenus dans le sol, et non d'humus complexes et formule sa loi des *minimums* (le rendement se cale au minimum des quantités disponibles de N ou de P ou de K, et non sur la quantité d'un seul de ces intrants) (Muratet, 2012). Ses travaux

déclenchent en France *la querelle du nitrate*. Quelques années plus tard, le Britannique *John Bennet Lawes* développa une méthode pour traiter les os à l'acide sulfurique pour produire de l'engrais, et il fit construire la première usine de superphosphates près de Londres (Boulaine, 2006).

En 1835, le premier bateau chargé de Guano Péruvien accoste dans les portes de l'Angleterre, et les Anglais établissent un monopole de guano. En 1856, le Congrès américain vote pour « Guano-Island-Act » (Muratet, 2012), et en 1864, la France mit en place sa « réglementation des engrais chimiques » pour réunir une « commission des engrais » dont le rôle est de classer les fertilisants et d'émettre des avis définitifs quant à leur valeur respective (UNIFA, 2001). Cette commission était dirigée par le géologue *Jean-Baptiste Boussingault* et le chimiste *Jean-Baptiste Dumas*, ce dernier était le plus grand contestataire de la théorie de *Liebig* (Muratet, 2012). Quelques années plus tard, la France arrive à gagner le monopole du guano grâce à *Auguste Dreyfus*, qui a conclu un contrat de distribution avec le gouvernement péruvien (De Laverne, 1896).



Fig. 1. Cap-horniers géants du nitrate dans un port Allemand vers 1900 (Muratet., 2012).

Vers la fin des années 1860, le Guano chilien commence à s'épuiser pour laisser la place au nitrate de potasse de la Bolivie. Ce dernier était pour longtemps exploité par le Chili et emporté vers la France (De Laverne, 1896). En 1879, le Chili déclare la « *Guerre du Pacifique* » à la Bolivie qu'elle a confiée l'exploitation des ressources de Salpêtre (Artigas, 2005). L'Allemagne, sa première destination du *Salpêtre* depuis 1870, l'appui fortement dans cette guerre, alors que le Pérou soutint l'armée Bolivienne. Le traité de paix était signé quatre ans plus tard à Paris (Artigas, 2005).

L'ammoniac, synthétisé à partir de l'azote par le chimiste allemand *Fritz Haber* en 1894, vient bousculer le monde agricole (Simaan, 2005). Le brevet de ce produit a été vendu très cher à *BASF* « La Compagnie Allemande de l'Industrie des produits chimiques et du Plastique » "*Baden Aniline and Soda Factory*" est industrialisée à partir de 1910 (Perutz, 1997). La France bénéficia de cette technologie grâce aux compensations du traité de Versailles à la fin de la 1^{ère} guerre mondiale (Encyclopædia, 2013). Recherché comme criminel de guerre, devenu Suisse, Haber n'en obtint pas moins, en 1920, le prix Nobel de chimie « 1918 » pour avoir sauvé le monde de la famine (James Laylin, 1993).

2. Définitions

2.1. Définition des fertilisants

Selon le dictionnaire français « *Larousse* », un fertilisant « se dit de produits destinés à assurer ou à améliorer la nutrition des végétaux et les propriétés des sols » (Larousse, 2014a), et le même dictionnaire détermine l'engrais comme « Produit organique ou minéral incorporé à la terre pour en maintenir ou en accroître la fertilité » (Larousse, 2014b). La traduction directe des mots français « *Fertilisant* » ou « *Engrais* » vers l'Anglais ou vers l'Arabe, les dictionnaires nous donne le mot « *Fertilizer* ». En plus, les dictionnaires emploient le mot « *Engrais* » comme synonyme du mot « *Fertilisant* ». Dans cette étude on a choisi d'utiliser le mot « *Fertilisant* » pour exprimer les produits chimiques utilisés principalement pour enrichir le sol pauvre en éléments nutritifs nécessaires à la croissance des plantes.

Boukhenfouf, 2011 a déterminé les engrais (fertilisants) comme : « des substances, le plus souvent des mélanges d'éléments minéraux, destinées à apporter aux plantes des compléments d'éléments nutritifs de façon à améliorer leur croissance et augmenter le rendement et la qualité des cultures. L'action consistant à apporter un engrais s'appelle la fertilisation. La fertilisation se pratique en agriculture et lors des activités du jardinage. Les fertilisants furent utilisés dès l'Antiquité, où l'on ajoutait au sol, de façon empirique, les phosphates des os (calcinés ou non), l'azote des fumures animales et humaines, le potassium des cendres » (Boukhenfouf., 2011)

2.2. L'élément azote

L'azote (N) fourni par les fertilisants est un élément essentiel à la croissance et au bon développement de la plupart des plantes supérieures. Il constitue l'élément majeur le plus limitatif pour la croissance de ces plantes. C'est un constituant essentiel des protéines, des acides nucléiques et de la chlorophylle. Il s'agit donc à la fois d'un facteur de croissance et de qualité (Ziadi., 2007 ; UNIFA, 2013).

2.3. L'élément phosphore

Le phosphore assimilé par la plante sous forme de phosphate joue un rôle physiologique à plusieurs niveaux (Matthieu., 2010). Le phosphore favorise la croissance précoce par une stimulation de la croissance des racines², il accélère le développement avec pour conséquence une maturation plus précoce des grains (Matthieu., 2010).

Le phosphore contribue à la rigidité des tissus et favorise la résistance à la verse, il permet une augmentation de la résistance au froid et aux maladies, il est essentiel à la formation des grains, et améliore la réponse de plusieurs cultures à la fertilisation azotée (Castillon and Massé, 2005 ; Fardeau, 2005 ; Matthieu, 2010). En effet, pour que les plantes utilisent le supplément d'azote (par exemple pour la synthèse des protéines ou de la chlorophylle), elles ont besoin de plus de phosphore pour fournir l'ATP nécessaire (Castillon and Massé, 2005 ; Matthieu, 2010).

2.4. L'élément potassium

Le potassium est l'un des éléments nutritifs de base pour les plantes (Boves and Church, 1970). Le potassium retient l'eau dans les cellules végétales par pression osmotique qui permet à la plante de résister aux intempéries et au gel, et contribue également à la formation de la cellulose, de l'amidon et du sucre (Abu-Eishah et al., 2000).

Le potassium est caractérisé par sa mobilité dans la plante, il joue plusieurs rôles, il

² (Un apport localisé de phosphore entraîne une prolifération des racines dans cette zone. La réponse des racines est moindre pour des apports localisés de potassium ou d'ammonium)

intervient dans l'équilibre acido-basique des cellules et régularise les échanges intracellulaires (Boves and Church., 1970 ; Walter et al., 1968). Le potassium joue un rôle important dans la réduction de la transpiration des plantes, il augmentant la résistance à la sécheresse (UNIFA, 2005b ; Walter et al., 1968). Il active la photosynthèse et favorise la formation des glucides dans la feuille, il participe à la formation des protéines, et favorise leur migration vers les organes de réserve (tubercules et fruits), il contribue à renforcer les parois cellulaires, offrant aux plantes une meilleure résistance à la verse et à l'agression des maladies ou parasites (UNIFA, 2005b ; Boves and Church, 1970 ; Walter et al., 1968; Faust, 1989).

3. Présentation générale de la filière de production des fertilisants

L'industrie des fertilisants est considérée comme une filière de l'industrie pétrochimique. L'ammoniac, qui présente la matière première principale pour tous les fertilisants minéraux azotés, est généralement produit à base de gaz naturel ou de charbon (Kool et al., 2012). L'activité essentielle de la filière des fertilisants consiste à produire les trois principaux éléments nutritifs des plantes, l'azote, le phosphore et le potassium, et chaque élément présente une sous-filière (IPCC, 2007).

Si les trois sous-filières de l'industrie des fertilisants partagent en commun l'agriculture comme principal débouché, elles possèdent chacun des fondamentaux distincts tels que les produits proposés, l'organisation des acteurs ou bien les procédés industriels. (MAAP, 2010).

Pour répondre à la croissance exponentielle du secteur agricole, la production mondiale des fertilisants a fortement augmenté au cours des 30 dernières années. De 110 Millions de tonnes (MT) par an, la production mondiale a atteint les 225 MT en 2011, selon l'association internationale de l'industrie des fertilisants. Cette dernière estime, par ailleurs, que la demande globale devrait croître de 2,1 % par an en moyenne au cours des cinq prochaines années (IFA, 2007). Après une contraction de 7,6% en 2008/2009, la consommation mondiale a récupéré près de 5% en 2009/2010. Dans son ensemble, la consommation des fertilisants a augmentée de 40% entre 1980 et 2010. Les fertilisants azotés représentent 60% de la consommation mondiale des fertilisants (Figure 2), suivi par le phosphate 25% et le potassium 15% (MAAP, 2010).

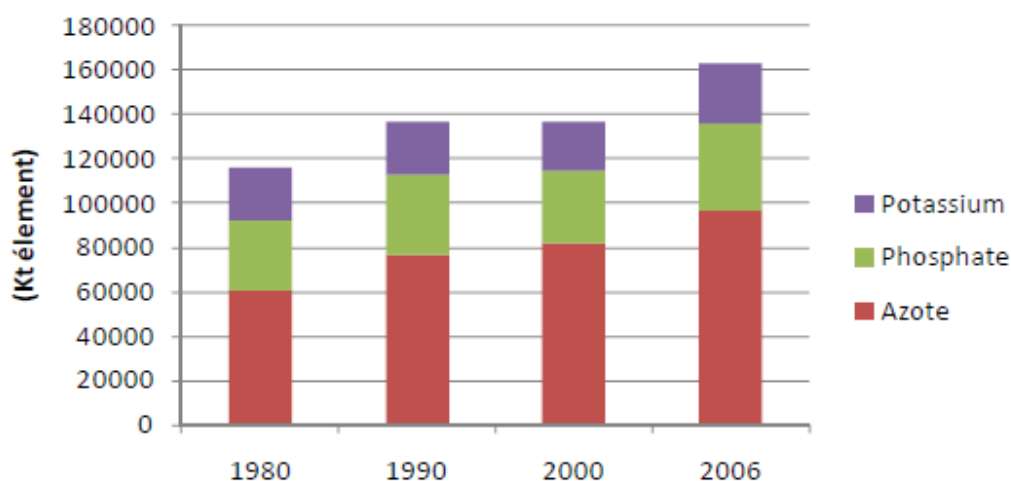


Fig. 2. Consommation mondiale des fertilisants minéraux (IFA, 2007).

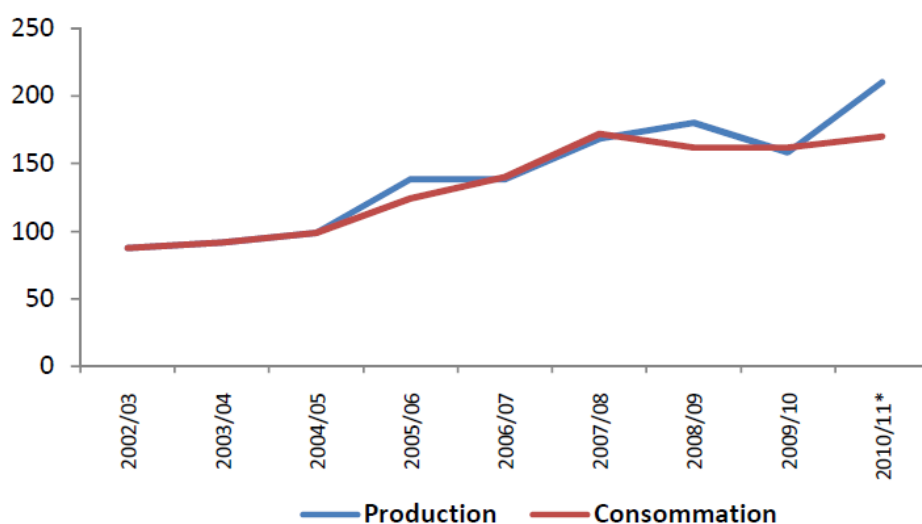


Fig. 3. Évolution du marché mondial des fertilisants (DSS, 2010).

La consommation mondiale des fertilisants a beaucoup changée avec le temps. Dès le début des années 1990, les États-Unis et l'Union européenne (UE) ont pris un objectif de réduire l'utilisation des fertilisants dans la production agricole. En 1965, ils représentaient 55% de la consommation mondiale des fertilisants (IFA, 2011). Actuellement, l'UE-15 ne représente plus que 7% de la consommation mondiale (9% pour l'UE-27) (IFA, 2011). En 2010, les États-Unis, la Chine et l'Inde concentraient 57% du total de la consommation (Figure 4). La Chine est devenue le premier consommateur mondial, avec près de 30 % des utilisations totales, suivies de l'Inde (16 %) (IFA, 2011 ; MAAP, 2010 ; UNIFA, 2011).

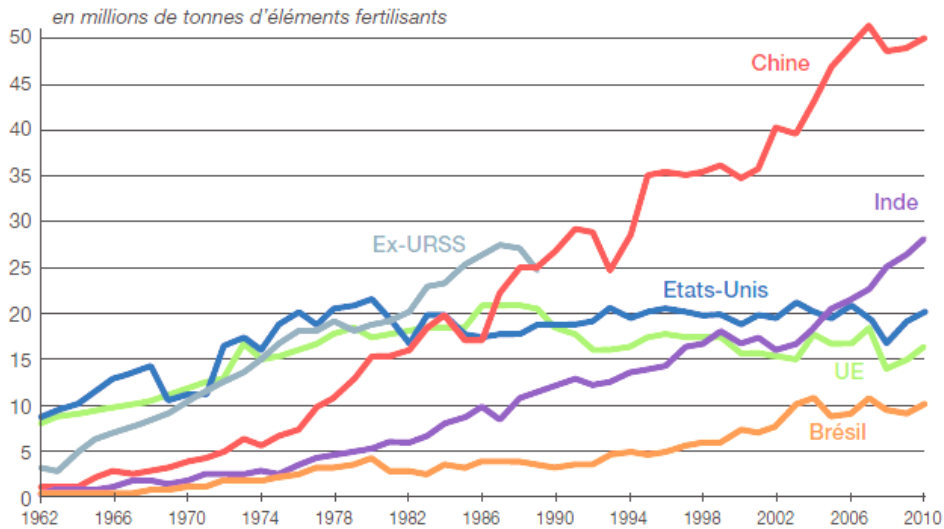


Fig. 4. Consommation mondiale des fertilisants minéraux par pays (IFA, 2011).

3.1. Les fertilisants azotés

3.1.1. L'Ammoniac, matière première des fertilisants azotés

Par son tonnage produit dans le monde, l'ammoniac est l'un des produits chimiques les plus importants, en raison de sa présence en tant que matière première dans la fabrication des fertilisants azotés (urée, sulfate d'ammonium, nitrate d'ammonium), d'acide nitrique et d'autres (Gilbert et Thornley, 2010). L'ammoniac est utilisé dans l'agriculture, la production des fertilisants, l'industrie pétrolière, l'industrie des pâtes et papiers, l'industrie du caoutchouc, l'industrie alimentaire et des boissons (CORRIM, 2001).

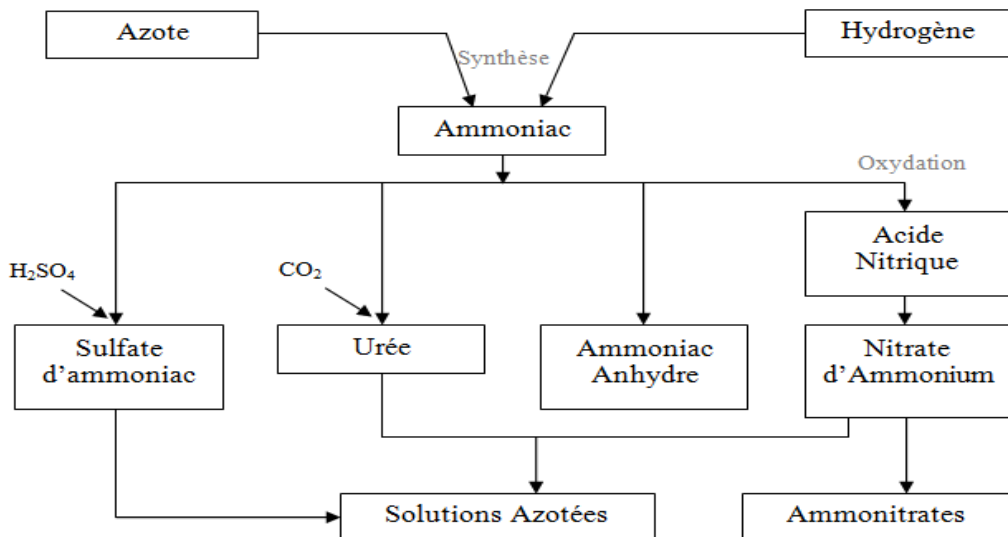


Fig. 5. La production des fertilisants azotés à base d'ammoniac (UNIFA, 2010 ; IFA, 2011).

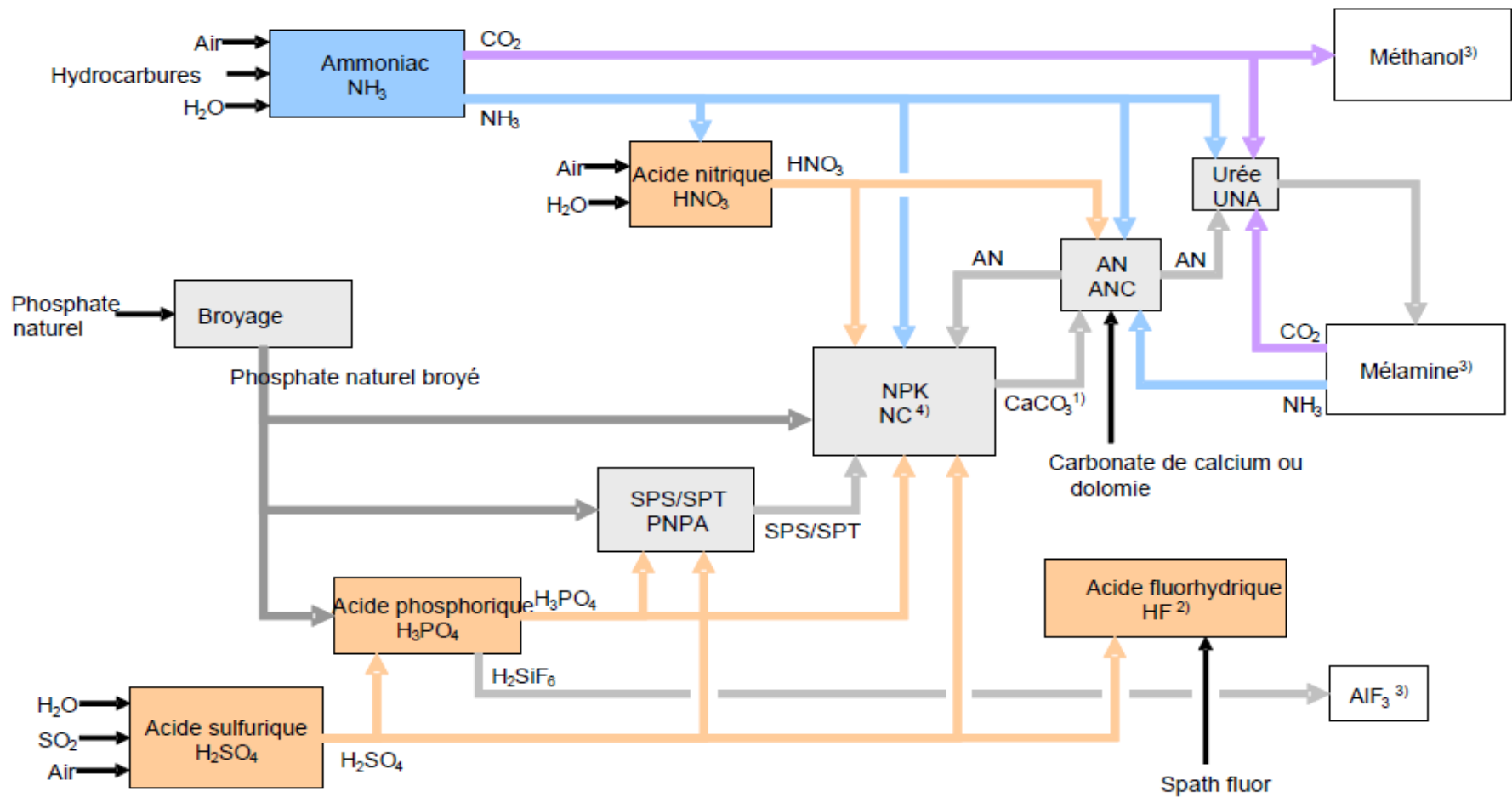


Fig. 6. Vue d'ensemble des interactions entre les secteurs concernés par la fabrication de produits chimiques inorganiques en grands volumes (IPCC, 2007).

À travers le monde, il existe plusieurs producteurs, produisant 166 millions de tonnes d'ammoniac par an (IFA., 2007), dont l'Algérie fournit 0,4% (Benouaret., 2011). La méthode conventionnelle de production d'ammoniac est le procédé Haber-Bosch. C'est le procédé industriel de fixation de l'azote de l'air le plus rentable (MAAP, 2010). Le processus est basé sur la combinaison de l'hydrogène (H₂) à partir du craquage des hydrocarbures (gaz naturel, pétrole et charbon), avec de l'azote (N₂) de l'air (Wood et Cowie, 2004).

Tableau 1. Les parts des différents carburants fossiles utilisés comme matière première et combustible dans la production d'ammoniac (IEA, 2007).

	Gaz	Pétrole	Charbon	MJ/t NH ₃
Europe de l'ouest	100%	-	-	35
Amérique du nord	100%	-	-	37,9
Russie et Europe centrale	98,9%	1,1%	-	40,7
Chine et Inde	26,5%	18,7%	54,7%	47,6
Reste du monde	100%	-	-	36,4
Moyenne Européenne	70,7%	8,2%	21%	41,5

À travers le monde, le gaz naturel est la principale matière première utilisée dans la production de l'ammoniac (100% pour l'Europe de l'Ouest et l'Amérique du Nord, 98,9% pour la Russie et l'Europe du centre), sauf pour la Chine et l'Inde où ensemble le pétrole et le charbon ont une part de 80% et 50% respectivement (IEA, 2007).

Le procédé de production d'ammoniac consomme beaucoup d'énergie et provoque principalement la génération des GES. L'industrie mondiale d'ammoniac est responsable de 0,93% des émissions globales des GES (Gilbert et Thornley, 2010). La production d'une tonne d'ammoniac émet environ 1,5t de CO₂ dans l'atmosphère (Anderson et al., 2008).

La Chine est le plus grand producteur d'ammoniac par 30% de la production mondiale et l'Inde par 8% (IFA, 2011). La consommation d'énergie par tonne d'ammoniac en Chine et en Inde est très élevée $48,8 \times 10^3$ et $43,3 \times 10^3$ MJ respectivement ; la moyenne mondiale est de $41,5 \times 10^3$ MJ/t (IEA, 2007), et la moyenne européenne est de $34,7 \times 10^3$ MJ/t (Haas & Van Dijk, 2010).

Le marché mondial d'ammoniac est fortement dépendant du marché de l'énergie et particulièrement du gaz naturel. Si le gaz naturel est utilisé comme source d'hydrogène, le coût du gaz représente 80% du coût global de fabrication d'ammoniac (EFMA, 2000a). La

maitrise des contraintes économiques, rencontrées lors de la production d'ammoniac, est dépendante de la connaissance des facteurs qui influencent le marché du gaz naturel (IEA, 2010).

3.1.2. L'Acide nitrique

L'acide nitrique est un composé inorganique utilisé dans la production de nitrate d'ammonium, de nitrate de calcium, et de Nitrate de Potassium (Wood and Cowie, 2004). Comme matière première, il est aussi utilisé dans la production de l'acide adipique et les explosifs, la gravure sur métal, et dans le traitement des métaux ferreux (Mainhardt, 2000).

La méthode la plus répandue dans la production de l'acide nitrique est l'oxydation catalytique de l'ammoniac à haute pression (Ahlgren et al., 2008). Toutes les unités de production de l'acide nitrique sont basées sur la même réaction chimique : l'oxydation de l'ammoniac avec l'air pour obtenir du monoxyde de nitrogène ; l'oxydation du monoxyde de nitrogène en dioxyde de nitrogène ; et ensuite, l'absorption dans l'eau pour obtenir une solution de l'acide nitrique (EFMA, 2000b). La réaction de l'ammoniac à l'acide nitrique est exothermique, elle contribue à la génération d'une quantité considérable de vapeur, qui peut être considérée comme un crédit d'énergie ou d'émission dans le compte de l'émission des GES (IPCC, 2000).

Comme l'utilisation principale de l'acide nitrique est la production des fertilisants, la tendance de la production d'acide nitrique est étroitement liée à la cadence de la consommation des fertilisants. Les tendances futures dans la production des fertilisants varient considérablement selon les régions (IPCC, 2007). Dans certaines parties de l'Europe occidentale, l'utilisation des fertilisants à base d'azote est en baisse en raison de la prise de conscience des problèmes environnementaux dus à l'utilisation excessive des fertilisants minéraux (Mainhardt, 2000 ; IPCC, 2007). Les autres régions comme l'Asie, l'Amérique du Sud, et le Moyen Orient sont en train de construire leurs capacités de production de fertilisants azotés (CMR, 1998b). Aux États-Unis, la production de fertilisants est augmentée de 4% entre la fin de 20^{ème} siècle et le la fin des années 2000 (FAO, 2005). Autres facteurs à considérer sont les programmes des gouvernements, les conditions météorologiques et la croissance économique générale. En conséquence d'avoir de nombreuses variables, il est

difficile de prévoir l'avenir de la production d'acide nitrique (IFA, 2009).

3.1.3. L'Urée

L'urée est le principal fertilisant azoté utilisé dans le monde, plus de 53% de la production d'ammoniac est orientée vers l'urée. La capacité mondiale de production de l'urée est passée de 78 millions de tonnes en 1993 à 121 millions en 2010 (Wood and Cowie, 2004 ; IFA, 2011). La part des autres produits fabriqués à base d'ammoniac reste relativement faible (Fertecon, 2007).

L'urée est fabriquée à partir de la synthèse de l'ammoniac et du CO₂. La production de l'urée est toujours liée aux unités de production d'ammoniac, où le CO₂ résultant de la synthèse d'ammoniac est utilisé comme matière première (EFMA, 2000c ; Wood and Cowie, 2004). Il existe deux formes d'urée industrielle :

- Urée perlée, 1-4 mm
- Urée granulée, 3-5mm

Pour des raisons économiques, l'urée existait sous forme perlée. Actuellement, l'urée perlée constitue encore la forme majoritaire produite. Cependant, les améliorations industrielles ont permis la fabrication de la forme granulée. De diamètre plus important, elle permet une meilleure utilisation par les agriculteurs (MAAP, 2010).

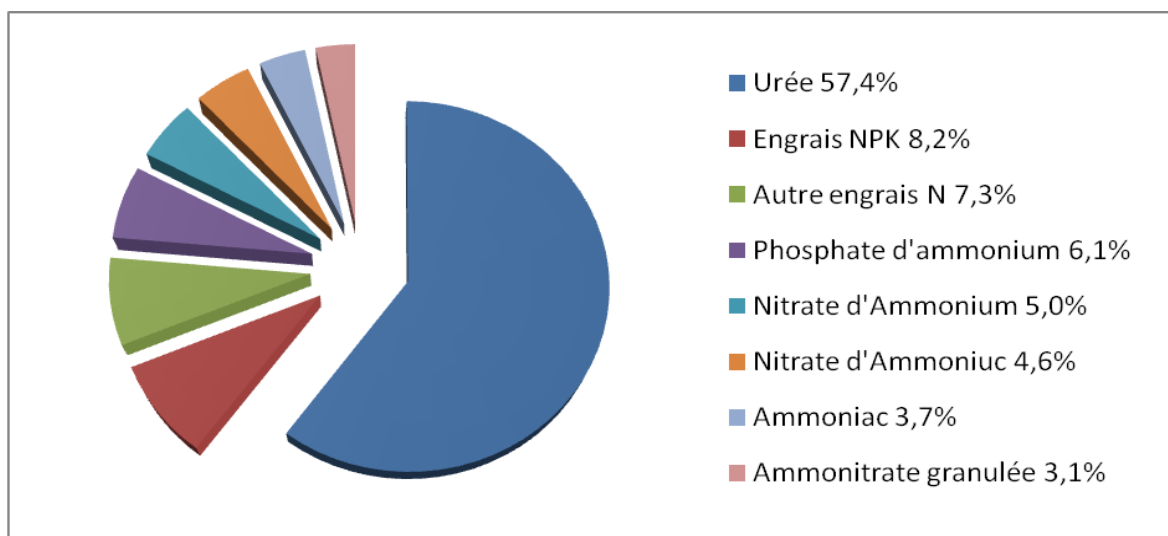


Fig. 7. Répartition de la consommation de l'élément azote par produit (IFA, 2006).

3.1.4. Ammonium Nitrate et Calcium Ammonium Nitrate

Le nitrate d'ammonium (NA) de formule NH_4NO_3 a été découvert en 1659 par Hans Rudolf Glauber. Ce dernier l'avait surnommé « nitrum flammans », il est principalement utilisé comme fertilisant azoté sous le nom d'Ammonitrate. Cependant, il est également doté d'un grand pouvoir oxydant et entre dans la composition de certains explosifs (SCF, 2013).

Le calcium ammonium nitrate (CAN) est un dérivé de NA ; en fait, c'est un mélange de NA et de carbonate de calcium/magnésium (DOE, 2000). Le CAN est la principale source d'azote en Europe occidentale. Sa concentration en azote est comprise entre 25% et 28%, et il contient, en outre, environ 10% de calcium. La teneur en chaux du CAN aide à neutraliser l'acidité du sol (EFMA, 2000d).

Le nitrate d'ammonium est plus concentré (33,5% à 34,5% N) et est le plus couramment utilisé en France, au Royaume-Uni, en Espagne et l'Italie. L'utilisation de nitrate d'ammonium est limitée dans certains pays (Davis and Haglund, 1999 ; Patyk, 1996 ; Isherwood, 2012).

La solution de nitrate d'ammonium est produite par la neutralisation de l'acide nitrique par la partie restante de l'ammoniac dans une réaction exothermique. La solution est ensuite évaporée pour éliminer l'eau. Une usine moderne produit assez de chaleur dans la neutralisation pour éliminer l'eau (Jenssen et Kongshaug, 2003). Le nitrate d'ammonium est ensuite granulé. La demande en électricité est relativement faible, elle est de 90 MJ/t de nitrate d'ammonium produits (EFMA, 2000d).

3.2. Les fertilisants Phosphatés

3.2.1. Le phosphate matière première des fertilisants phosphatés

L'industrie du phosphate est une industrie minière basée sur l'extraction du phosphate naturel (MAAP, 2012). La roche phosphatée est la matière principale utilisée dans la production de la plus part des fertilisants phosphatés (FAO, 2012). Avec accès à des minerais riches en phosphore, le Maroc, la Chine et les États-Unis sont les acteurs les plus importants dans l'industrie mondiale du phosphate (Guichon-vannes, 2014).

La roche, provenant des mines, est d'abord envoyée aux unités de valorisation pour

séparer le sable et l'argile et pour éliminer les impuretés. La plupart des procédés sont humides pour faciliter le transport et pour réduire la poussière (FAO, 2012 ; UNIFA 2010). Le tableau 2 ci-dessous montre les principaux pays producteurs de phosphate dans le monde.

Tableau 2. Principaux producteurs de phosphate dans le monde (USGS, 2014)

Pays	Quantité	Pays	Quantité
Chine	97 000	Jordanie	7 000
Etats-Unis	32 300	Brésil	6 740
Maroc	28 000	Egypte	6 000
Russie	11 200	Tunisie	4 000

Comme l'illustre le schéma ci-dessous (Figure 8), le phosphate naturel est à la base de l'ensemble des produits phosphatés existants :

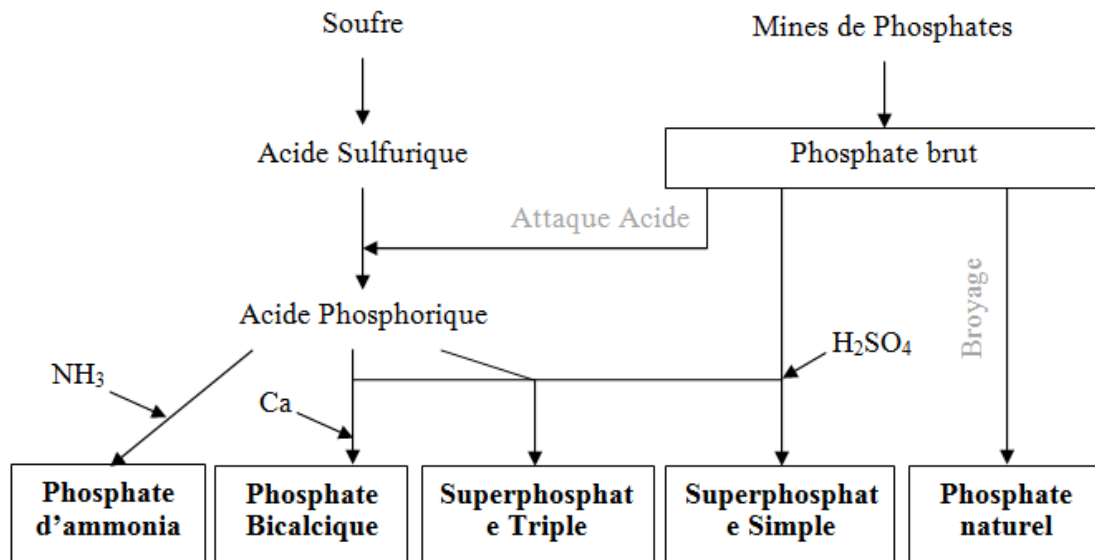


Fig. 8. Principe de fabrication des fertilisants phosphatés (UNIFA, 2010 ; IFA, 2011).

3.2.2. L'acide phosphorique

L'acide phosphorique, ou plus correctement acide orthophosphorique H₃PO₄ (Perreira, 2003), est un composé cristallin incolore (IPCC, 2007). L'acide phosphorique est une composante importante de l'industrie des fertilisants (intermédiaire entre la roche phosphatée et les principaux produits tels que le phosphate diammoniac (DAP), le phosphate monoammoniac (MAP), ou encore le Triple Superphosphate (TSP) utilisé en agriculture) (Perreira, 2003 ; IPCC, 2007).

Tableau 3. Statistiques du marché mondial de l'acide phosphorique (IFA, 2014a).

Région	Production	Exportation	Importation	Consommation
Union européenne	986	544	2 560	2 254
Amérique du nord	15 235	866	234	14 602
Amérique du Sud	3 612	249	518	3 881
Afrique	10 467	5 059	61	5 468
Asie de l'Est	32 834	525	715	33 024
Total Monde	77 413	7 777	7 777	77 412

Quantité en milliers de t. Données relatives à l'année 2012

L'acide phosphorique est utilisé principalement dans la production des fertilisants (environ 80%), dans les laboratoires, dans les boissons non alcoolisées comme régulateur de pH (E338), la fabrication du ciment dentaire, la fabrication des détergents, et dans le traitement de l'eau et comme supplément alimentaire (IRIS, 2005 ; CSST, 2006 ; IPCC, 2007 ; Bonnard et al., 2011).

3.2.2.1. Procédés de production

L'acide phosphorique est issu de l'attaque du minerai fluoro-phosphate de calcium par de l'acide sulfurique H_2SO_4 (Perreira, 2003 ; IPCC, 2007). Généralement, les utilisateurs d'acide phosphorique et de fertilisants phosphatés demandent une teneur minimum de 28% de P_2O_5 et la plupart des catégories de phosphates commercialisées contiennent moins de 30 %, pour répondre à cette exigence, le minerai de phosphate subit un traitement (Bonnard et al., 2011).

a. Voie thermique

L'acide phosphorique destiné à la fabrication de phosphates alimentaires ou techniques peut être élaboré par voie thermique par réduction de phosphate naturel, en présence de coke ou de silice, au four électrique à 2000°C. Le phosphore obtenu est oxydé en P_2O_5 puis hydraté en acide. La voie thermique est utilisée lorsque l'on a pour objectif l'obtention d'un acide phosphorique de qualité alimentaire. Dans l'acide phosphorique, la teneur en P_2O_5 est de l'ordre de 52 à 54%. Ce procédé présente l'avantage de fournir un acide pur. Mais, il est coûteux, car c'est un grand consommateur d'énergie (Perreira, 2003 ; Boussem, 2007).

b. Voie humide

Le phosphate de calcium étant insoluble dans l'eau, les phosphates naturels doivent être traités pour que les plantes puissent absorber le phosphore contenu. Il est su, depuis longtemps, que l'acide phosphorique résulte de l'attaque des phosphates naturels par un acide fort, le plus souvent sulfurique (Perreira, 2003 ; Boussen, 2007 ; Athanasios et al., 2009).

3.2.3. Phosphate Diammoniac et Phosphate Monoammoniac

Le Phosphate Diammoniac (DAP) et le Phosphate Monoammoniac (MAP) sont les nutriments de phosphate qui donnent le plus de croissance et les plus utilisés dans le monde (IPNI, 2014a, b). Ensemble, le DAP et le MAP présentent près de 48% des fertilisants phosphatés consommés dans le monde, et seulement 1,5 % du phosphate naturel est utilisé en épandage direct (MAAP, 2010).

Le DAP est fabriqué par la réaction de l'acide phosphorique et de l'ammoniac. Constitué de 18% d'azote ammoniacal et 46% de P_2O_5 , il se présente sous forme granulée et offre l'avantage d'être très concentré en éléments fertilisants (IPNI, 2014a).

Le procédé de fabrication de MAP est relativement simple. Dans une méthode courante, c'est la réaction d'un rapport « Un par Un » d'ammoniac et d'acide phosphorique (H_3PO_4) (IPNI, 2014b).

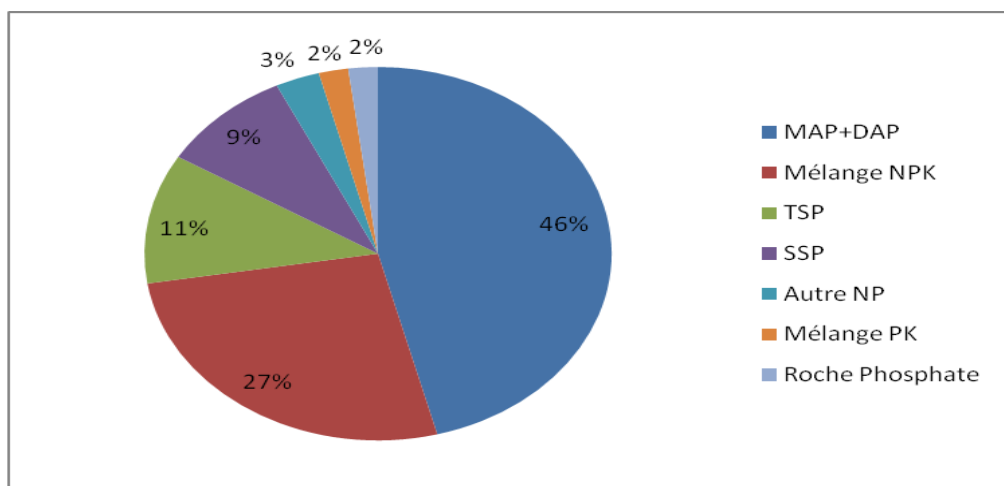


Fig. 9. Répartition de la consommation de l'élément phosphate par produit, moyenne mondiale des années 2004 à 2008 (Kool et al., 2012).

3.2.4. Triple Superphosphate et Super Simple Phosphate

Le Triple Superphosphate (TSP), également connu sous le nom double, triple, ou concentré (superphosphate), est un matériau de fertilisation d'une teneur en phosphore de plus de 40 %, mesurée comme le pentoxyde de phosphore (P_2O_5) (Mann, 1992).

Le Simple Superphosphate (SSP) fait référence à une teneur de 15 à 21 % de phosphore que le pentoxyde de phosphore (P_2O_5). Tel que défini par le Bureau du recensement, le Superphosphate Simple ne contient pas plus de 22 % de P_2O_5 disponible (Mann, 1992 ; Nyers et al., 1979). Le SSP est fabriqué en traitant le phosphate avec de l'acide sulfurique, et le TSP est fabriqué en traitant le phosphate avec de l'acide phosphorique (Wiesenberger, 2002).

Tableau 4. Statistiques du marché mondial du Triple Superphosphate (IFA, 2014b).

Région	Production	Exportation	Importation	Consommation
Union européenne	154	93	155	217
Amérique du nord	0	0	79	79
Amérique du Sud	540	90	637	1 088
Afrique	691	613	48	126
Asie de l'Est	851	392	137	597
Total Monde	2 810	1 466	1 466	2 810

*Quantité en milliers de t. **Données relatives à l'année 2012

3.3. Les fertilisants potassiques

3.3.1. Le potassium matière première des fertilisants potassiques

Le potassium est un métal alcalin (Casenave, 2005). Il se trouve dans des minerais contenant un mélange de divers sels tels que chlorure de potassium, chlorure de sodium, sels de magnésium (UNIFA, 2005b).

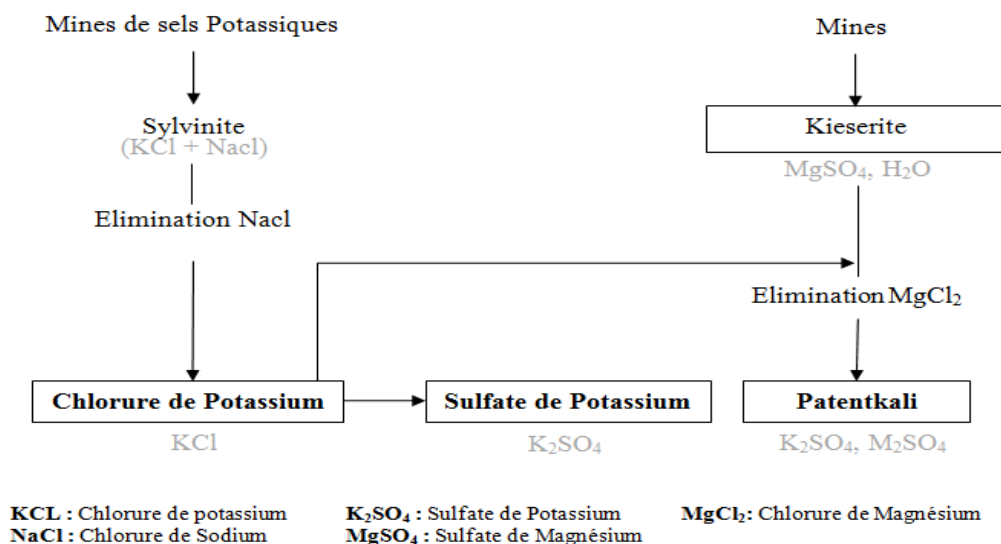


Fig. 10. Principe de fabrication des fertilisants potassiques (UNIFA, 2005b).

Le potassium se trouve largement distribué dans la croûte terrestre. Il est non seulement trouvé dans chaque plante et animal vivants, mais se retrouve aussi dans les roches, les minéraux, les sols, les lacs, les rivières et les océans (IPNI, 2014c).

Tableau 5. Statistiques du marché mondial du Triple Superphosphate (IFA, 2014c).

Région	Production	Exportation	Importation	Consommation
Union européenne	8 150	7 107	7 322	8 366
Amérique du nord	16 192	13 844	6 604	8 951
Amérique du Sud	2 599	1 256	9 231	10 574
Afrique	0	0	685	685
Asie de l'Est	4 265	0	12 019	16 284
Total Monde	52 083	38 278	38 278	52 083

Quantité en milliers de t. Données relatives à l'année 2012

3.3.1. Chlorure de potassium

Le chlorure de potassium (KCl) est un sel soluble dans l'eau avec une valeur fertilisante de 60% d'oxyde de potassium (K₂O) (UNIFA, 2005b). Le chlorure de potassium est principalement utilisé dans la production des fertilisants (95%) (SCF, 2013), il présente même la plus grande part des fertilisants potassiques utilisés (IPI, 2012).

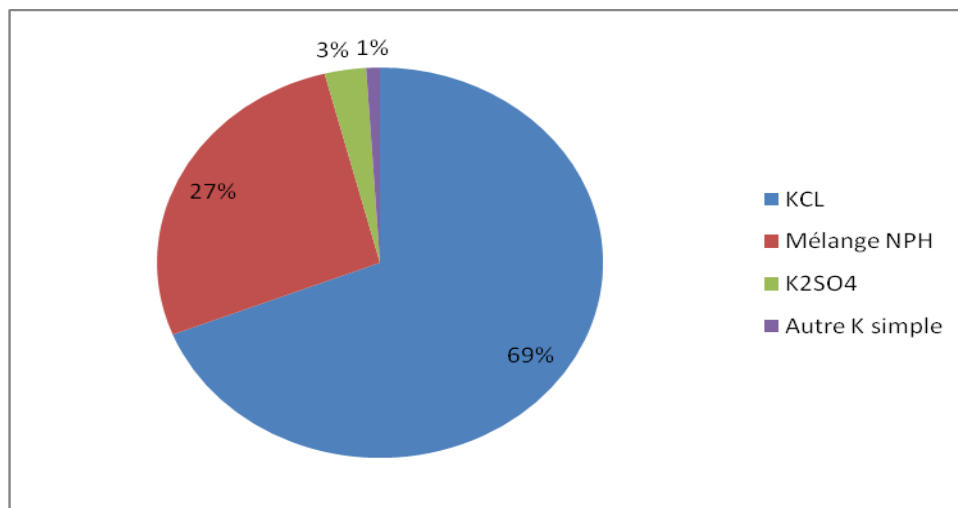


Fig. 11. Répartition de la consommation de l'élément potassium par produit. (IFA, 2006).

Deux procédés sont utilisés pour la production du chlorure de potassium : le traitement thermique par dissolution puis cristallisation et la flottation (SCF, 2013).

3.3.1.1. Procédé thermique (par dissolution puis cristallisation)

Le minerai est attaqué à 100°C par une solution aqueuse saturée à 20°C (eau-mère) en KCl et NaCl (147 g/l de KCl et 292 g/l de NaCl). Seul KCl passe en solution. La solution saturée (saumure) à 100°C contient alors 280 g/l de KCl et 250 g/l de NaCl. Par refroidissement jusqu'à 30°C et par évaporation sous vide, KCl cristallisé et la saumure redevient eau-mère. Le rendement en KCl est d'environ 93 %.

3.3.1.2. Procédé humide (par flottation)

Le minerai broyé à environ 0,8 mm, afin de libérer ses divers constituants, est mis en suspension dans une eau-mère froide. L'injection massive d'air, dans des cellules de 8,3 m³ et l'ajout de collecteur, moussant (huile de pin) et déprimant (fécule de pomme de terre) permet de faire flotter KCl qui est récupéré dans les mousses. Les rendements de récupération sont de 92 à 93 %.

Le chlorure de potassium obtenu selon le procédé thermique est blanc, celui obtenu par flottation est rose (couleur qu'il possède dans le minerai). Le coproduit principal est le chlorure de sodium qui est soit stocké et utilisé en partie comme sel de déneigement soit évacué dans les cours d'eau. Le KCl sous forme de poudre est utilisé dans la production des

fertilisants composés NPK. Le KCl sous forme granulée est utilisé dans la production des autres produits granulés comme l'urée, le nitrate d'ammonium ou le DAP (Patnaik, 2002 ; SCF, 2013).

3.3.2. Sulfate de potassium

Le sulfate de potassium (K_2SO_4) est un sel cristallin blanc non inflammable qui est soluble dans l'eau. Le sulfate de potassium est obtenu par action de l'acide sulfurique concentré sur KCl dans des fours Mannheim, à 800°C (IFDC, 1998 ; Patnaik, 2002 ; MAAP, 2010).

Le sulfate de potassium, qui est également produit à partir de sels extraits de gisements naturels, est utilisé comme fertilisant potassique dans les sols salins, en remplacement du chlorure de potassium (il contient moins de 1% de chlore), et pour des cultures telles que le tabac, les fruits et légumes (Patnaik, 2002 ; MAAP, 2010).

A la différence d'autres fertilisants potassiques, le sulfate de potassium est également une source importante de soufre, puisqu'il en contient environ 18%. Il convient donc parfaitement aux cultures exigeantes ou carencées en soufre (SOPIB, 2012 ; Tereos, 2012).

3.4. Les fertilisants composés

Deux classes de fertilisants composés existent, la première concerne les fertilisants composés binaires (NP, PK, NK), et la seconde est représentée par les fertilisants composés ternaires classiques NPK avec ses différentes formules (NPK 3x15, NPK 3x10).

4. Le secteur de production des fertilisants en Algérie

4.1. Historique et perspective

Dès l'indépendance, les autorités algériennes ont déployées tous les efforts nécessaires pour assurer l'indépendance alimentaire du pays, par la mise en œuvre de plusieurs politiques de développement du secteur agricole et des secteurs qui y sont liés (Chabane, 2013).

Après avoir mis à niveau les usines de productions des matières premières héritées de

l'époque coloniale³, le gouvernement algérien a procédé à la création du secteur de production des fertilisants par la création d'« *ASMIDAL* ». Après la mise en marche des unités de production des fertilisants phosphatés au niveau de la plate forme d'Annaba en 1972, les unités de production d'ammoniac et des fertilisants azotés, ont été mises en service en 1982. Cette dernière est la plus grande et la plus importante unité au niveau national. La plate-forme spécialisée dans la production d'ammoniac et de l'urée d'Arzew à Oran a aussi joué un rôle important dans la satisfaction des besoins locaux et à l'importation.

Malgré les efforts employés et les mécanismes adoptés par les autorités locales pour développer le secteur des fertilisants, ce dernier a connu une forte régression dans les années 1990, avec les difficultés financières qu'a connue Fertial (à cette époque connue sous le nom d'ASMIDAL), et le démantèlement de l'unité de production d'acide phosphorique au niveau de la plateforme d'Annaba.

4.2. Principaux acteurs dans le secteur

Dès le début des années 2000, avec la remédiation de l'économie locale en bénéficiant de la remontée des prix des hydrocarbures dans le marché mondial, les autorités algériennes ont essayées de remettre en œuvre le plan de développement du secteur, par la signature du pacte de partenariat entre ASMIDAL et le groupe espagnol « Villar Mir » ; la création de « Sorfert Algérie » en joint-venture entre le groupe égyptien Orascom Construction Industrie (OCI) et la compagnie publique des hydrocarbures « Sonatrach » avec une capacité de production de 2 200 t/j d'ammoniac et 3 400 t/j d'urée (Maghreb, 2013), ou la création de l'entreprise appelée « Al Sharika El Djazairia El Omania lil Asmida » (AOA) dotée d'une ligne de production d'ammoniac de 4 000 t/j et 2 200 t/j, et d'une autre ligne de production d'urée d'une capacité nominale de 3 800t/j.

Bien que le partenariat avec « Villar Mir » ait donné des résultats inattendus, les deux derniers ont été un grand échec à cause de l'impasse des négociations de la règle 51/49 avec le

³ L'usine de production de phosphate de Bir El-Ater et les unités de traitement du gaz naturel au champ de Hassi R'mel, ont fait la première pierre du secteur de production des fertilisants en Algérie grâce à leur rôle comme fournisseurs de matières premières.

premier et des prix des hydrocarbures avec le second. En bénéficiant de cette situation de blocage, Fertial a bien profité pour renforcer sa position dans le marché local et pour chercher de la place dans le marché mondial en tant qu'exportateur d'ammoniac et d'autres fertilisants (econostrum, 2014).

5. Présentation du complexe FERTIAL-Annaba

5.1. Présentation générale

Le complexe FERTIAL-Annaba (initialement appelé ASMIDAL) a été mis en service en 1972 pour répondre aux besoins du marché national des fertilisants. Sa mission principale est le développement, la production et la commercialisation des fertilisants azotés et phosphatés ainsi que les produits chimiques tels que l'ammoniac, l'acide nitrique et l'Ammonitrate. Aujourd'hui FERTIAL-Annaba est le plus grand producteur des fertilisants au niveau national.

FERTIAL, Société des Fertilisants d'Algérie, est le résultat du pacte de partenariat signé en aout 2005 entre le groupe espagnol « Villar-Mir » et « ASMIDAL » dont cette dernière détient 33% du capital (Fertial.com, 2012). Après l'investissement de près de deux millions de dollars US pour la rénovation des équipements industriels du complexe, Fertial a gagné des parts considérables de marché intérieur (Fertial news, 2005). A la fin de l'année 2010, la production annuelle de « Fertial-Annaba » a atteint 200 000 t des différentes gammes des fertilisants, 258 138 t d'ammoniac et 44 852 t d'acide nitrique.

5.2. Localisation de l'usine

Le complexe de production des fertilisants et des produits chimiques « Fertial-Annaba » est implanté dans l'extrême Est-Algérien, dans la wilaya d'Annaba. L'ensemble des unités de production du complexe est regroupé dans une unique plateforme (OPTIME, 2007).

Le complexe est bordé au Nord-Est par la mer méditerranée, au Sud-Est par l'oued Seybouse et la cité de Sidi Salem, au Sud-Ouest par la RN 44 et la cité El-Bouni et au Nord-Ouest par l'Oued Boudjima et la cité Seybouse (Figure 12).



Fig. 12. Localisation du complexe « Fertil-Annaba »

L'usine se trouve à moins de 3 km du port d'Annaba et à 5 km de l'aéroport. La voie ferrée, qui part du complexe, assure le transport d'une grande partie des produits finis vers les différentes destinations.

La partie nord de l'usine est réservée pour les unités de production des fertilisants azotés (ammoniac, acide nitrique et nitrate d'ammonium) et la Centrale Utilité II dont l'objectif de cette dernière est le dessalement de l'eau de mer et la production de vapeur HP. Dans la zone Sud, sont implantées les unités de production des fertilisants phosphatés (unité SSP, Urée et l'unité de production des fertilisants NPK) et les halls de stockage des produits finis.

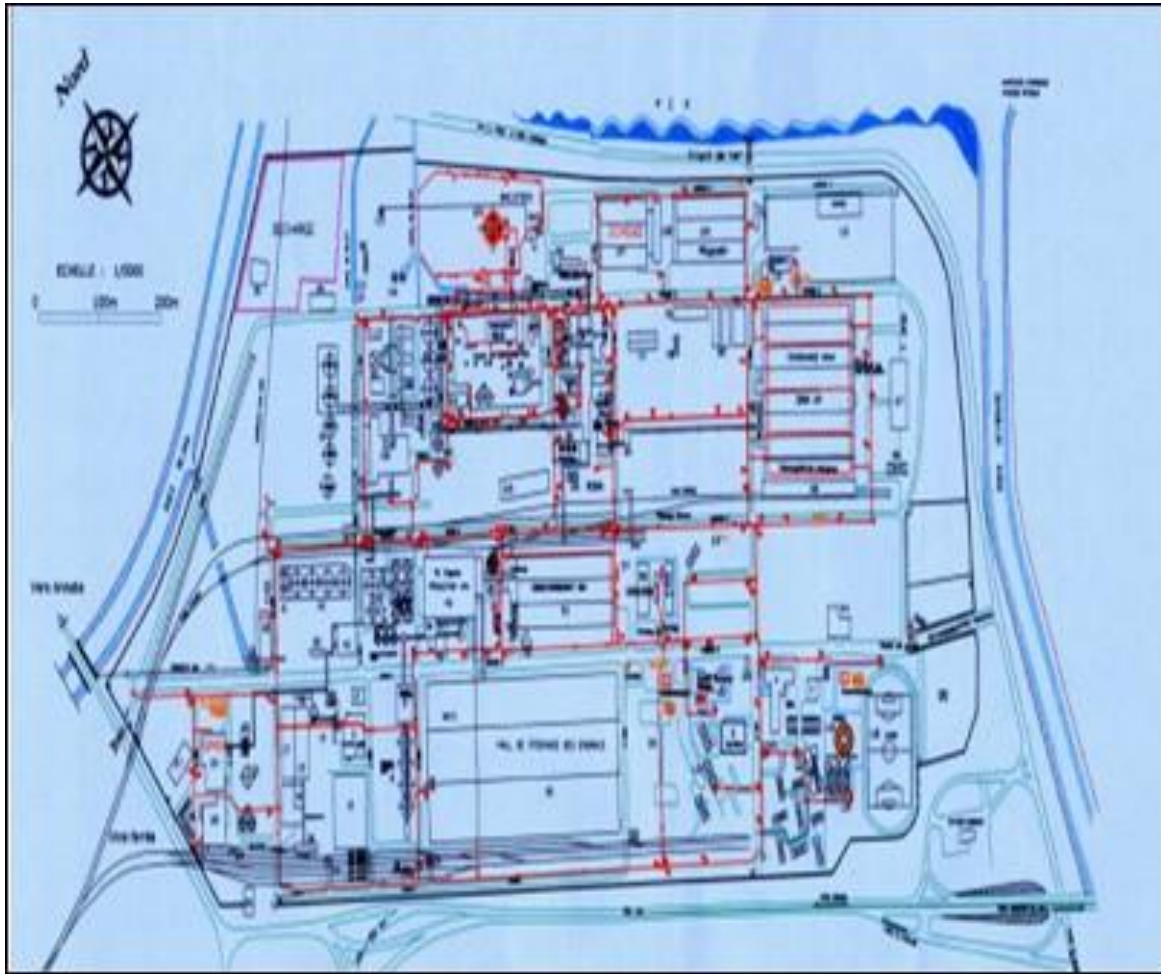


Fig. 13. Plan de masse du complexe Fertil-Annaba

5. 3. Les activités de Fertil-Annaba

Fertil-Annaba est filiale du complexe industriel de production des fertilisants et des produits chimiques, avec la plateforme d'Arzew, ils forment le groupe de Fertil-Algérie. La plateforme d'Annaba compte plusieurs unités de production ainsi que des unités d'utilités.

Tableau 6. Principaux produits fournis des unités de production de FERTIAL-Annaba

Dénomination des installations	Production principale
Unité ammoniac	Ammoniac liquide anhydre
Unité acide nitrique	Acide nitrique 57%
Unité ammonitrate	Calcium ammonium nitrate 27%
	Nitrate d'ammonium 33,5% Prill
	Nitrate d'ammonium 34,5% Prill
Unité SSP	Solution nitrate
Unité UAN	Super Simple Phosphate (SSP)
	Urée ammonitrate

Unité NPK	NPK 15.15.15s NPK 15.15.15ch NPK 10.10.10s NP 02.20.00 Triple Super Phosphate (TSP) Sulfazot
Centrale utilitaire II	Eau dessalée Eau déminée Vapeur haute pression

Le tableau 6 ci-dessus montre les différentes unités de production à la plateforme d'Annaba ainsi que les produits correspondants à chaque unité. Le tableau 7 exprime les caractéristiques techniques de chaque produit.

Tableau 7. Caractéristiques techniques des produits objets de l'étude

Type de fertilisant	Produit	Composition
Composé	NPKch 3x15 (à base de Chlorure de potassium)	Azote total : 15% P ₂ O ₅ total : 15% min P ₂ O ₅ assimilable : 14% Potassium : 15%
	NPKs 3x15 (à base de Sulfate de potassium)	Azote total : 15% P ₂ O ₅ total : 15% min P ₂ O ₅ assimilable : 14% Potassium : 15% Soufre : 8 %
Simple à base de phosphate	Triple Super Phosphate (TSP)	P ₂ O ₅ total : 46% P ₂ O ₅ assimilable : 45%
	Super Phosphate Simple (SSP)	P ₂ O ₅ total : 20% P ₂ O ₅ assimilable : 16% P ₂ O ₅ soluble dans l'eau : 15% SO ₃ : 22% CaO : 28%
Simple à base d'azote	Sulfazot	Azote total : 26% Azote nitrique : 6,5% Azote ammoniacal : 19,5% Anhydride sulfurique : 35%
	Calcium ammonium nitrate (CAN)	Azote total : 27% Azote nitrique : 13,5% Azote ammoniacal : 13,5% CaO : 7,5% MgO : 3,5%

5.3.1. Unité d'ammoniac

Cette unité est spécialisée dans la production d'ammoniac liquide anhydre avec 99% de

pureté selon le procédé « *Haber-Bosch* ». L'unité est dotée d'une ligne de production avec une capacité nominale de 1 000 t/j. La majeure partie du produit est destinée à l'exportation, le reste est utilisé comme matière première dans la production de l'acide nitrique, la solution nitrate, et les fertilisants azotés.

5.3.2. Unité acide nitrique

L'unité est destinée à la production d'acide nitrique concentré à 57%, elle est équipée de deux lignes de production de 400 t/j chacune. L'unité travaille selon le procédé de production « *Ostwald* ». La majorité du produit issu de l'unité est réinjecté dans les procédés de production des fertilisants principalement le CAN, le reste est destiné à la commercialisation.

5.3.3. Unité nitrate d'ammonium

L'unité est équipée de deux lignes de production de nitrate d'ammonium avec une capacité nominale de 500 t/j chacune. L'unité fonctionne selon le procédé finlandais « *Stamicarbon* », les principaux produits de l'unité sont le nitrate d'ammonium liquide (actuellement non produit pour des raisons sécuritaires), le nitrate d'ammonium solide à 33,5% et 34,5% (Prill), et le principal produit calcium ammonium nitrate à 27% d'azote. Une partie des produits est exportée alors que le reste est utilisé dans la production des NPK.

5.3.4. Unité SSP

L'unité est conçue spécialement pour la production du SSP liquide selon le procédé « *Sackett* », sa capacité de production est de 800 t/j. Le produit issu de l'unité à l'état liquide est orienté vers l'unité « NPK » pour granulation.

5.3.5. Unité NPK

L'unité est conçue pour la production des fertilisants selon le procédé « *PECHINEY Saint-Gobain* », elle est composée de deux lignes de production avec une capacité de 1 050 t/j chacune. La capacité de stockage des matières premières et des produits finis est de 150 000 t.

5.3.6. Unité UAN

L'unité est spécialisée dans la production d'Urée et de la solution d'UAN (urée ammonium nitrate), ce dernier est obtenu à 28%, 30%, et 32%. La capacité de production de l'unité est de 600 t/j.

5.3.7. Centrale utilité II (CU II)

La Centrale utilité II est conçue pour fournir le complexe en électricité, eau dessalée, eau déminéralisée et vapeur. La centrale est composée de :

- Une station de pompage d'eau de mer composée de trois pompes ;
- Quatre dessaleurs ;
- Station de déminéralisation ;
- Quatre chaudières ;
- Deux groupes turboalternateurs ;
- Une station de compression d'air.

5.4. Commercialisation et distribution

5.4.1. Commercialisation

La production de FERTIAL-Annaba est destinée pour couvrir la demande du marché local en fertilisants et produits chimiques. Pratiquement, FERTIAL-Annaba couvre entre 65 et 70% de la demande national en fertilisants. Le tableau 8 montre les chiffres de production des fertilisants pour les années 2009 à 2012.

Tableau 8. Statistiques des ventes de Fertial-Annaba

Produit	2009	2010	2011	2012
NPKs 3x15	45 751	74 395	72 038	100 310
NPKch 3x15	396	-	570	2 357
NPKs 3x10	714	-	-	-
PK	1 732	3 279	2 859	4 720
TSP	9 063	44 584	38 910	20 440
SSP	4 275	9 392	4 613	4 582
Urée	13 334	31 717	68 681	52 175
SAM	-	380	720	707

UAN	346	418	374	336
Sulfazot	291	8 410	18 638	13 151
Total	75 902	172 585	207 404	196 791

5.4.2. Distribution des produits Fertial-Annaba (FERTIAL, 2014)

Le réseau de distribution de Fertial couvre tout le territoire national, afin d'assurer en permanence la disponibilité de ses produits.

5.4.1.1. Asfertrade

Asfertrade est une filiale du Holding « ASMIDAL » dont l'objectif est d'assurer la commercialisation des produits de Fertial, Asfertrade dispose de quatre dépôts de distribution de fertilisants situés à Ain Defla, Alger, Annaba, Oran.

5.4.1.2. CCLS et UCC

Dans le but de renforcer son réseau de distribution et de se rapprocher davantage de ces clients, Fertial s'appuie sur les services des Coopératives de Céréales et de Légumes secs (CCLS) et ceux de l'Union des Coopératives des Céréales (UCC) qui disposent de 45 dépôts de distribution répartis sur le territoire national (15 dépôts dans la région Est, 09 dépôts dans le Centre, 18 dépôts à l'Ouest, et 3 dépôts au Sud).

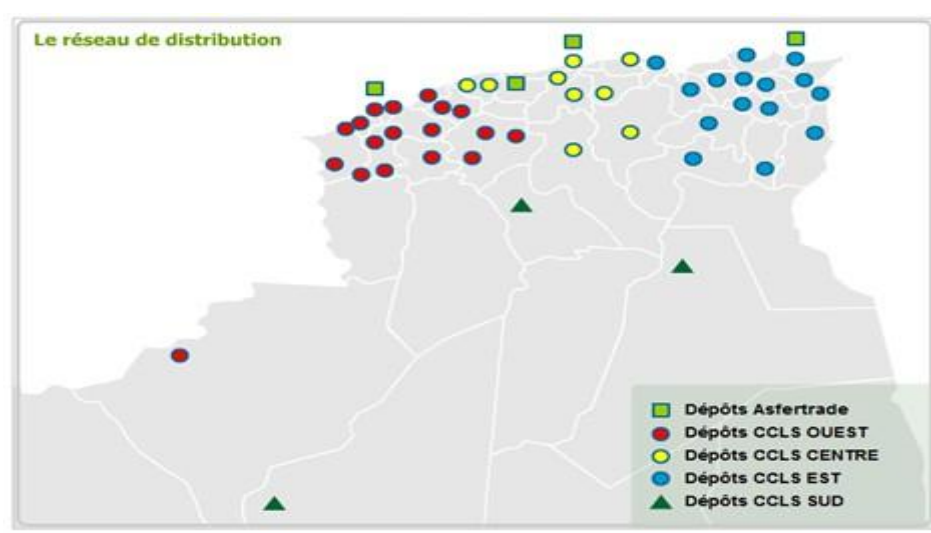


Fig. 14. Réseau de distribution et de déposé des produits de Fertial-Annaba.

CHAPITRE 2

ANALYSE DE CYCLE DE VIE : OUTIL D'ÉVALUATION DES PERFORMANCES ENVIRONNEMENTALES

1. Historique de l'ACV

Jusqu'à la fin des années 1950, la protection de l'environnement n'était pas une question de priorité dans le milieu industriel (San José, 2005). Au début des années 1960, les inquiétudes sur la consommation excessive des ressources naturelles, la pollution et la surexploitation des systèmes naturels sont devenues un souci public qui nécessite une étude pour projeter l'approvisionnement et l'utilisation future de ces ressources (Belem et al., 2005).

À la Conférence mondiale de l'Énergie en 1963, Harold Smith a rapporté son calcul des besoins cumulatifs d'énergie pour la production de produits et des intermédiaires chimiques (SAIC, 2006). Jusqu'à la fin des années 1960, d'autres études ont étudié l'aspect de cycle de vie des matériaux et des produits, bien qu'elles soient basées sur le même principe de l'ACV, ces études se sont concentrées sur l'efficacité énergétique, la consommation des matières premières et la gestion des déchets (SAIC, 2006 ; EEA, 1997).

En 1969, Coca-Cola a financé une étude dont le but était de comparer la consommation des ressources naturelles et la génération des déchets associés à la production de deux types de contenants de boisson (Rober and William, 1996). Aux États-Unis, ce type d'étude est dénommé Analyse des Ressources et du Profil Environnemental (ARPE) (Rober and William, 1996). En Europe, il a été appelé « *Ecobilan* » (Belem et al., 2005). L'ACV dans sa vision moderne a été développé à partir de ce concept. Cependant, le champ d'analyse de l'ACV a été étendu pour qu'il prenne en compte en plus des ressources énergétiques, les autres ressources naturelles ainsi que l'émission des polluants et la génération des déchets (SAIC, 2006).

La publication du rapport « *Limits of Growth* » en 1972, où les auteurs ont analysé la croissance exponentielle des populations mondiales et leur besoin en ressources naturelles

(Westkämper et al., 2000). En conclusion, le rapport souligne que : « la croissance matérielle perpétuelle conduira tôt ou tard à un *effondrement* du monde qui nous entoure. Par *effondrement* il ne faut pas entendre la fin de l'humanité, mais la diminution brutale de la population accompagnée d'une dégradation significative des conditions de vie de la fraction survivante » (Meadows et al., 1972).

La première crise pétrolière d'octobre 1973 est venue pour consolider la prise de conscience relative à l'environnement (Leroy, 2009). Une meilleure gestion des ressources énergétiques est devenue alors une évidence. L'optimisation et la rationalisation de la consommation des ressources naturelles sont devenues une question prioritaire pour les pays occidentaux (Belem et al., 2005). En 1979, Lan Boustead a publié « *le manuel d'analyse d'énergie industrielle* » (Dale et al., 2011), dans lequel il définit l'analyse de l'énergie comme « une technique pour examiner la façon dont les sources d'énergie sont mises à profit pour effectuer des fonctions utiles » (Boustead et Hancock, 1979).

Les années 80 marquent l'apparition des premiers bilans écologiques, malgré que les préoccupations environnementales décalées aux problèmes de gestion des déchets dangereux et des ménages (Dale et al., 2011), mais l'analyse de l'inventaire du cycle de vie a continué d'être menée et la méthodologie améliorée (Rober and William, 1996 ; SAIC, 2006). En Europe, la Commission européenne a créé la Direction de l'Environnement (DG X1) dans le but de travailler à uniformiser la réglementation de la pollution à travers l'Europe, cette direction, a publié « *Liquid Food Container Directive* » en 1985. Cette dernière va charger les entreprises membres de surveiller la consommation d'énergie, les matières premières, et la production de déchets solides de conteneurs alimentaires liquides (SAIC, 2006).

Jusqu'au début des années 1990, l'ACV était d'un intérêt limité (en dehors d'une très petite communauté de scientifiques). Mais depuis, il y a eu l'apparition du guide appelé « *Environmental Life Cycle Assessment of Products* », publié par le centre des sciences de l'environnement (CML) de l'université Leiden aux Pays-Bas. Le guide propose une nouvelle approche d'évaluation des impacts environnementaux orientée problème (Heijungs et al, 1992), et la publication de « *The LCA Sourcebook* » en 1993, ce dernier est considéré comme l'étude la plus complète jusqu'à ce moment, ont facilités la sortie des travaux du laboratoire au monde réel (EEA, 1997). Le processus de normalisation devient incontournable afin de

crédibiliser la méthodologie, le but était de définir le domaine de validité des résultats (SAIC, 2006). Après les ateliers du SETAC en 1991 et en 1993, la création de « Society for the Promotion of Life Cycle Development » (SPOLD) en 1992, un format de communication pour les données d'ACV, a été créée en 1995-1996 (SAIC, 2006 ; Belem et al., 2005).

En 1996, le premier journal spécialisé en ACV « *The International Journal of Life Cycle Assessment* » voit le jour, et en 1998, l'International Standard Organisation (ISO) prend en charge la réalisation des premières normes ACV. La première qui est publiée est la norme ISO 14040 et rapidement suivit par l'ISO 14041, 14042 et 14043 (ISO, 1998 ; ISO, 1999). Ces dernières seront mises à jour et regroupées dans la norme ISO 14044 (ISO, 2006a ; ISO, 2006b).

Le début du troisième millénaire a marqué l'histoire de l'ACV. Le lancement de l'Initiative pour le Cycle de Vie en collaboration entre le SETAC et le PNUE en 2002 (Jeanneret et al., 2014), la création de la base de données d'inventaire « *Ecoinvent* » (Frischknecht et Rebitzer, 2005), l'élaboration de « *CML V2* » la deuxième version de CML en 2000 (Ligthart et al., 2010), et la création de la nouvelle méthode « *IMPACT 2002+* » en 2003 (Jolliet et al., 2003). En 2009, l'ACV a marquée son entrée aux pays du Sud par l'organisation d'une conférence sur le « *Life Cycle Management* » en Afrique du Sud (UNEP, 2012).

2. Définition et applications de l'ACV

2.1. Définition

L'Analyse de Cycle de Vie (ACV) est l'outil d'évaluation des performances environnementales d'un produit tout au long de son cycle de vie (SAIC, 2006). Le cycle de vie s'étend de l'extraction des matières premières nécessaires à la fabrication de produit, passant aux étapes de transformation de la matière première, de transport, de production, de distribution et d'utilisation de produit, et jusqu'à la gestion de ce produit en fin de vie soit par le réutilisation, le recyclage, ou l'élimination finale de produit (Guinée et al, 2002 ; Benoist, 2009). C'est une vision générale, donc « du berceau à la tombe » (Belem et al., 2005 ; Ligthart et al., 2010). L'ACV est aussi utilisée comme outil d'identification et d'évaluation des aspects environnementaux dans les systèmes du management environnemental (SME)

(Lewandowska et al., 2011).

L'International Standard Organisation (ISO) définit l'ACV comme étant : « Une compilation des intrants, des extrants et des impacts environnementaux potentiels d'un système de produits au cours de son cycle de vie » (ISO, 2006a).

Dans l'ACV, l'ensemble du système de fonction unitaire intervenant dans le cycle de vie d'un produit est appelé « *système de produit* », le terme « *produit* » est pris dans son sens le plus large, y compris les biens et les services (ISO, 1998). Il est important de noter que, dans une étude d'ACV, ce n'est pas le système de produit qui est l'objet d'étude, mais sa fonction (Hajjaji, 2011). La fonction de système de produit détermine le service rendu par le système étudié (ISO, 2006b). La fonction unitaire de système est appelée « *unité fonctionnelle* », elle caractérise les performances qualitatives de système (Leroy, 2009). Dans les études comparatives d'ACV, l'unité fonctionnelle est une donnée primordiale, c'est l'unité de référence nécessaire pour la comparaison des systèmes concurrents.

2.2. Utilisation de l'ACV

L'ACV est utilisée principalement pour l'évaluation de la performance environnementale du système de produit et l'identification des sources d'impacts environnementaux liés à ce système tout au long de son cycle de vie (Brentrup et al., 2004). Utilisée dans plusieurs domaines, l'ACV est un outil d'aide à la décision dont le but est la quantification des flux physiques de matière et d'énergie entrants dans le système, et l'évaluation des émissions sortantes et des impacts potentiels liés à ces dernières (EEA, 1997). Elle présente un outil indispensable pour la prise des décisions stratégiques, pour le choix entre des procédés industriels délivrant le même produit, ou deux produits fournissant la même fonction (Belem et al., 2005). L'ACV, est aussi utilisée en éco conception pour le développement et l'amélioration du produit par les industriels ou même pour déterminer une politique environnementale par le secteur public.

2.3. Avantages de l'ACV

Grâce à sa vision globale (du berceau à la tombe), l'ACV permet la quantification des impacts environnementaux liés à tout le cycle de vie de produit ainsi qu'à tous les processus

amont qui contribuent directement ou indirectement à la fabrication du produit. Cette vision, permet aussi de prendre en compte le transfert des polluants (Matthew et al., 2011).

L'ACV permet de quantifier les impacts potentiels vis-à-vis de l'environnement grâce à sa prise en compte de plusieurs facteurs d'impact. Le regroupement de ces facteurs d'impacts dans des catégories d'impact permet de fixer des objectifs précis en termes de qualité de l'environnement (Poncet, 2006).

2.4. Limites de l'ACV

Bien que l'ACV soit un outil d'évaluation des impacts d'un produit sur l'environnement régi par un ensemble de normes, cette méthode possède des limites à prendre en compte. Les limites de l'ACV peuvent être regroupées en deux catégories.

2.4.1. Limites méthodologiques

L'ACV est une méthode qui ne vise qu'à évaluer les impacts potentiels et non réels, les résultats obtenus dépendent fortement des hypothèses fixées au début de l'étude, de la définition de l'unité fonctionnelle et du risque d'une mauvaise interprétation des résultats obtenus de l'étude. C'est pourquoi, la définition des objectifs et du champ de l'étude et une étape primordiale (Rogers et al., 2008).

2.4.2. Limites liées aux données

L'inventaire des données d'entrée présente la plus importante limite à la réalisation d'une ACV. L'absence de données primaires fiables pour diverses raisons (confidentialité des données, difficulté d'accès aux données) implique le recours à des simplifications dans l'inventaire ou à des données génériques et bibliographiques simples (Benoît-Norris et al., 2011).

3. Méthodologie de l'ACV

La première norme d'ACV a été publiée par l'International Standard Organisation en 1998, aujourd'hui, les exigences liées à la pratique de l'ACV sont répertoriées dans la série des normes ISO 14040.

3.1. Typologie d'ACV

Malgré la grande variation des objectifs, des champs d'études, produits étudiés dans les études d'ACV, et la différence entre les méthodologies de réalisation, ces études peuvent être classées en deux grandes catégories principales : Prospective et Rétrospective.

L'ACV prospective donne les informations des conséquences environnementales des activités humaines. L'ACV rétrospective fournit les informations sur les propriétés environnementales du cycle de vie étudié et ses sous-systèmes. Les deux types d'ACV ont des limites méthodologiques. Les décisions basées sur l'ACV rétrospective peuvent avoir des conséquences environnementales indésirables. De l'autre côté, l'ACV prospective peut apparaître injuste et résulte dans des systèmes sous optimisés du point de vue environnemental (Ekvall et al., 2005).

L'ACV rétrospective est défini par son accent sur la description de la pertinence environnementale des flux physiques d'un ou vers un cycle de vie ainsi que de ses sous-systèmes. L'ACV Prospective est caractérisée par son objectif de décrire comment la pertinence environnementale des flux va changer en réponse aux décisions possibles (Tillman, 2000).

4. La réalisation d'une ACV

La réalisation d'une ACV est soumise à une démarche spécifique de quatre phases : la définition des objectifs et du champ de l'étude, l'inventaire du cycle de vie, l'évaluation de l'impact du cycle de vie, et l'interprétation du cycle de vie. Les différentes phases d'ACV ne sont pas obligatoirement consécutives, au-delà de l'approche classique donnée habituellement, il existe de multiples liaisons entre les différentes phases. Les étapes qui constituent le processus de l'ACV peuvent être graphiquement schématisées comme suit (Figure 15).

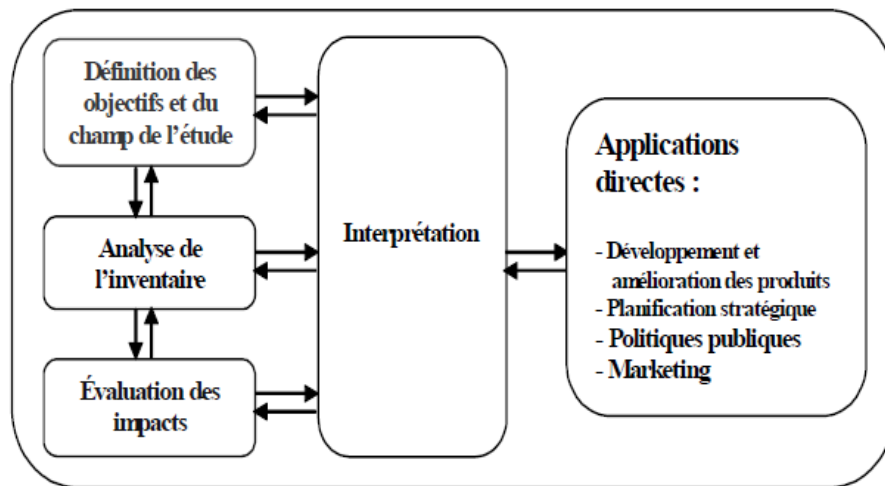


Fig. 15. Principales phases de l'Analyse de cycle de Vie (ISO, 2000b)

4.1. Définition des objectifs et du champ d'étude

En premier lieu, cette phase consiste à décrire le contexte de l'étude, ses objectifs et son cadre d'application. Ensuite, elle définit la fonction étudiée dans l'étude et définit l'unité fonctionnelle qui représente cette fonction. Enfin, elle détermine le champ d'étude et délimite ses frontières. Les éléments définis au cours de cette étape peuvent être revus au cours des étapes suivantes en cas de difficultés ou d'inadéquations.

Dans les lignes directrices scandinaves sur l'ACV, les décisions minimales suivantes et les définitions qui doivent être prises sont (Lindfors et al, 1995) :

- le but et l'application prévue
- la fonction du système étudié et l'unité fonctionnelle définie
- le groupe de produit étudié et les alternatives choisies, le cas échéant
- les limites du système appliqué
- la qualité des données nécessaires
- le processus de validation ou d'examen critique nécessaire

4.1.1. Objectifs de l'étude

L'objectif d'une étude ACV doit indiquer clairement la définition et description du produit, du procédé ou d'activité. La définition des objectifs doit indiquer aussi le contexte dans lequel est faite l'étude, et identifier les limites et les effets sur l'environnement qui seront

pris en considération dans l'étude. La définition de l'objectif est également faite dans le but de définir la destination et les utilisateurs des résultats (SAIC, 2006).

Les objectifs d'une ACV peuvent être :

- la comparaison de deux ou plusieurs produits qui remplissent la même fonction, pour que les résultats soient utilisés dans la commercialisation ou la réglementation de l'utilisation des produits.
- l'identification des possibilités d'amélioration dans le développement ultérieur des produits existants ou dans la conception de nouveaux produits.

4.1.2. Le champ d'étude

La définition du champ de l'ACV détermine les frontières de l'étude, les éléments inclus dans le système et les méthodes d'analyse qui doivent être utilisées.

Pour définir le champ d'étude, plusieurs éléments doivent être pris en compte, le système étudié, la fonction de ce système, l'unité fonctionnelle, et les limites du système. Le champ d'étude doit être suffisamment clair et bien défini pour s'assurer que tous les détails de l'étude sont suffisants pour satisfaire les objectifs de l'étude. S'il est nécessaire, le champ d'étude peut être modifié selon l'évolution de l'étude et la disponibilité des données (EEA, 1997).

La présentation graphique sous forme de diagramme des différents processus qui composent le système d'étude est recommandée. Ce diagramme doit présenter les processus et les flux alimentaires du cycle de vie. L'intérêt de cette présentation est de pouvoir identifier les intrants et les extrants du système objet d'étude (ISO, 2006b).

L'ensemble des flux entrants ou sortants du système tel que défini par ces frontières doit être pris en compte pour l'établissement du bilan environnemental réel du cycle de vie étudié. Cependant, dans un souci de simplification du travail à effectuer pour le praticien de l'ACV, l'ISO autorise l'exclusion de certains flux sous certains critères, dits critères de coupure (ISO, 2006a).

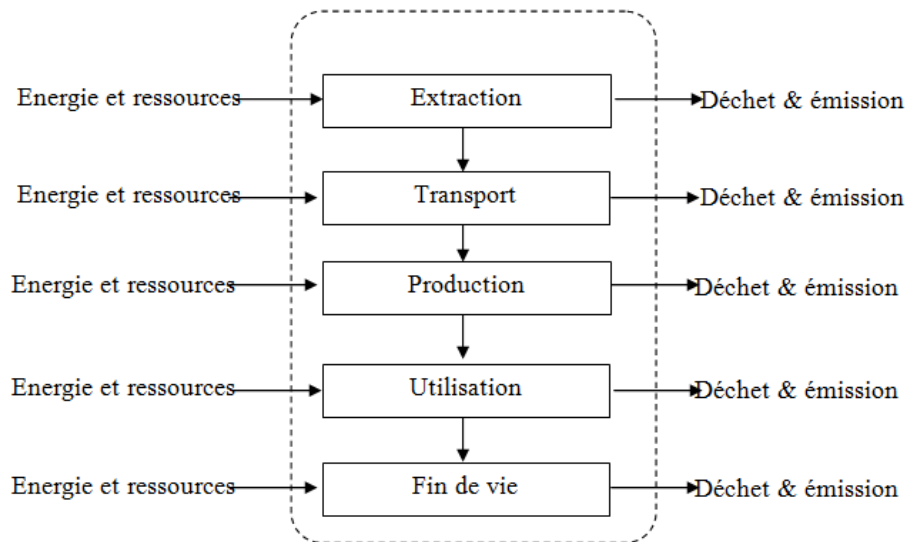


Fig. 16. Exemple simplifié de cycle de vie classique d'un produit (Basset-Mens, 2005)

Un flux peut être exclu de l'étude s'il répond à chacun des critères de coupure (la masse, l'énergie et la portée environnementale), mais ce principe peut nous conduire à négliger un élément potentiellement significatif pour le système étudié (ISO, 2006a). L'ISO a défini les trois critères de coupure minimaux :

- La masse : peut être exclu de l'étude un intrant dont la masse est en dessous d'un pourcentage défini de la masse totale des intrants ; (ISO, 2006b, Hajjaji, 2011)
- L'énergie : de façon similaire, peut être exclue de l'étude un intrant dont la contribution énergétique est en deçà d'un pourcentage défini des contributions énergétiques des intrants ; (ISO, 2006b, Hajjaji, 2011)
- La portée environnementale : par extension, peut être exclue de l'étude, un flux ou procédé dont les impacts environnementaux totaux n'excèdent pas un certain pourcentage des impacts environnementaux du produit étudié (selon Crettaz (2010), si une phase ou un procédé unitaire provoque une variation sur le résultat en dessous de 5%, ce procédé unitaire peut être négligé) (Crettaz et al., 2010).

4.1.3. L'unité fonctionnelle

L'unité fonctionnelle (UF) quantifie la fonction du système étudié (Cooper, 2003). L'unité fonctionnelle joue un rôle indispensable dans le cas d'une étude de comparaison entre deux ou plusieurs produits, ou l'étude en vue d'améliorer les performances environnementales

d'un produit ou d'un processus. Les données qui seront recueillies lors de la phase d'inventaire seront associées à l'unité fonctionnelle.

Une des raisons pour laquelle l'unité fonctionnelle doit être déterminée est de fournir une référence (physique) à laquelle les données d'entrée et de sortie du système seront attribuées. La comparaison entre les systèmes doit être effectuée sur la base de la même fonction, mesurée par la même unité fonctionnelle et sous forme des flux de références équivalents (Cooper, 2003 ; ISO, 2004b).

4.2. Inventaire de cycle de vie (ICV)

La phase de l'ICV comprend la collecte et le traitement des données nécessaires pour la réalisation de l'ACV. La réalisation de l'ICV consiste à quantifier les différents flux intrants et sortants dans le système, les flux de matières premières, d'énergies et des polluants émis. L'ensemble de ces flux est identifié et caractérisé par sa nature, par la qualité des données collectées pour le bilan et leur mode d'acquisition ou leur degré de représentativité (Basset-Mens, 2005). Ce bilan « énergie-matière » est normalisé par rapport à l'unité fonctionnelle définie au préalable.

Il existe deux méthodes de calcul de l'inventaire de cycle de vie, l'approche « *Processus* » et l'approche « *input Output* ». Le calcul d'inventaire selon l'approche « *Processus* » se fait en multipliant la masse des divers flux répertoriés par des facteurs d'émission ou d'extraction. L'inventaire récapitule les flux de référence ainsi que les différents flux intermédiaires correspondant au processus unitaire du système objet d'étude. Dans l'approche « *input-output* », l'inventaire se calcule en multipliant les dépenses par unité fonctionnelle avec les facteurs d'émission par unité monétaire dépensée (Suh et Huppés, 2002).

Les facteurs d'émissions et d'extractions expriment la masse des substances entrantes ou émises par unité fonctionnelle utilisée (Guinée et al., 2002). Les facteurs d'extractions sont calculés directement à partir du bilan annuel de production, mais l'évaluation de la quantité et la nature chimique des rejets gazeux est incertaine.

4.2.1. Qualité des données

La fiabilité des résultats de l'étude d'ACV dépend fortement de la qualité des données employées dans l'étude. La qualité des données a été toujours une limite pour la réalisation d'une ACV (paragraphe 2.4.2). Le niveau de confiance apporté à la qualité des données d'entrée dans l'inventaire détermine l'acceptation des résultats finaux de l'étude (Kennedy et al., 1996 ; Coulon et al., 1997).

L'analyse de la qualité des données peut être à partir de trois sources principales, l'International Standard Organisation (ISO), le Centre des Sciences Environnementales (CML), et la Société de Toxicologie Environnementale et de Chimie (SETAC). Le guide de l'ISO explique que les exigences de la qualité des données y compris : l'ancienneté des informations, les limites géographique et technologique, la précision, l'exhaustivité, et la représentativité des données ; la cohérence et la reproductibilité du modèle d'ACV, les sources de données et leur représentativité, et l'incertitude de l'information, doivent être fixées pendant l'élaboration de la phase de définition des objectifs de l'étude (ISO, 2006b).

Le guide CML recommande que les exigences de l'ISO soient suivies par l'utilisation éventuelle de l'un des cadres d'incertitude qu'il propose. Le groupe de travail européen en « *qualité des données* » le SETAC, a fourni un cadre pour l'incertitude, et les méthodes possibles pour calculer l'incertitude des données. Le cadre classe l'incertitude des données en « *inexactitude des données* » et « *absence de données spécifiques* » (c'est-à-dire des lacunes de données et les données non représentatives). Lacunes dans les données sont à pourvoir en utilisant soit la modélisation des entrées-sorties, les données sur des produits similaires ou des bilans de masse (Udo De Haes et al., 1999 ; Guinée et al., 2002).

4.3. L'évaluation des impacts environnementaux

Cette troisième phase consiste à traduire les quantités consommées d'énergie et de matières et les émissions de substances en termes d'impacts sur l'environnement et la santé humaine (Guinée et al., 2002). En effet, lors de l'émission d'une substance dans l'environnement, cette dernière évolue d'un milieu à l'autre, et change d'état ainsi que de concentration. L'objectif de cette phase est de réduire le nombre illimité de résultats pour faciliter leurs l'interprétation (Guinée et al., 2002).

Le court d'évolution de la substance est appelé « *la voie d'impact* » (ISO, 2006b). La détermination et la modélisation de ces voies sont la base sur laquelle les différentes méthodes d'évaluation d'impact reposent en reliant les données de l'inventaire avec les catégories d'impacts sur l'environnement prises en considération dans l'étude. Le choix des catégories d'impacts se fait en fonction des objectifs de l'étude (Guinée et al., 2002). Les indicateurs de catégorie d'impact et du modèle de caractérisation sont définis selon la méthode d'évaluation des impacts (Toffoletto, 2007). L'expression des bilans d'énergie et de masse passant par le système en termes d'impacts ou de dommages sur l'environnement et la santé humaine se déroule en trois principales étapes ; choix des catégories d'impacts, classification, et caractérisation (Sangely, 2010).

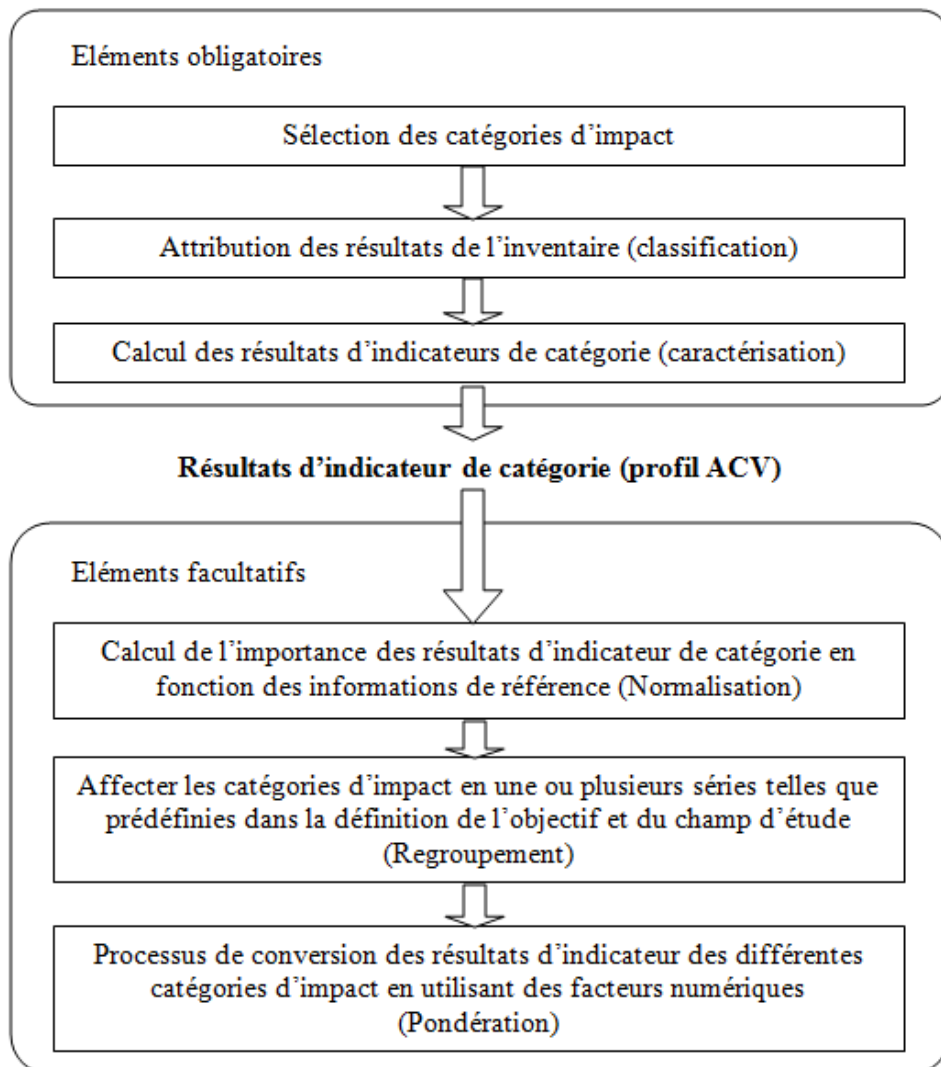


Fig. 17. Les différents éléments de la phase d'évaluation des impacts environnementaux

4.3.1. Choix des catégories d'impact

Cette première étape consiste à déterminer les catégories d'impact à prendre en compte dans l'étude ainsi que les modèles de caractérisation associés.

4.3.2. Classification

Chaque substance, identifiée lors de l'inventaire de cycle de vie contribue à une ou plusieurs catégories d'impact de façon particulière. Chaque catégorie d'impact est exprimée par un « *Indicateur de Catégorie* », celle-ci sert comme référence et caractérise l'impact en question. À chaque substance ciblée par une classe d'impact est attribué un coefficient traduisant sa contribution potentielle à l'impact. Ce facteur est appelé « Facteur de Caractérisation ». L'impact unitaire étant une fonction de la quantité émise ou consommée et du FC, il peut être exprimé sous la forme suivante (Leroy, 2009) :

$$I_{s,i} = Q_s \times FC_{s,i} \dots\dots\dots (1)$$

Avec :

$I_{s,i}$: l'impact environnemental de la substance s dans la catégorie d'impact considérée i ;

Q_s : la quantité de la substance s émise ou consommée ;

$FC_{s,i}$: le facteur de caractérisation correspondant à la substance s dans la catégorie i .

4.3.3. Caractérisation

Une fois la classification effectuée, la contribution potentielle totale de chaque catégorie est calculée en termes d'impact. L'impact total pour une catégorie d'impact est mesuré par la somme des impacts unitaires des substances contribuant à la catégorie d'impact. Cette étape est appelée « caractérisation ». La caractérisation peut-être effectuée en deux étapes, la caractérisation intermédiaire, et finale.

- La caractérisation intermédiaire (problème) : permet de pondérer chaque substance émise à la catégorie intermédiaire à laquelle elle contribue. Pour cela, on utilise les facteurs de caractérisation intermédiaires. Elle peut être exprimée sous la forme suivante (Laribi., 2012) :

$$S I_i = \sum_s I_{s,i} \dots\dots\dots(2)$$

Avec:

SI_i : Score d'impact intermédiaire de la catégorie i exprimé en kg équivalent d'un indicateur de catégorie ;

$\sum_s I_s$: la somme des impacts de chaque substance s contribuant à la catégorie d'impact considérée i .

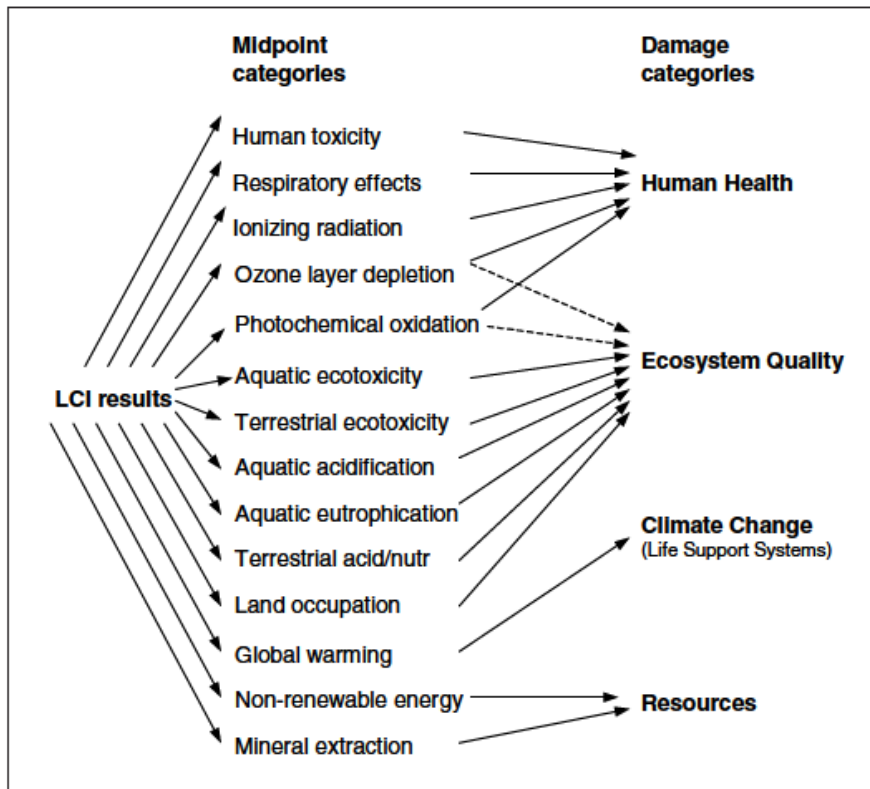


Fig. 18. Liste des catégories intermédiaires (problème) et catégories finales (dommage) (Jolliet et al., 2003)

- La caractérisation finale (dommage) : cette étape consiste à évaluer la contribution des impacts intermédiaires dans les catégories d'impact finales. Pour procéder à cette opération, on fait une pondération de tous les impacts intermédiaires à la catégorie de dommage correspondante (Jolliet et al., 2003) :

$$SD_d = \sum_s Q_s \cdot FC_{i,d} \dots\dots\dots(3)$$

SD_d : Score d'impact environnemental de la catégorie de Dommage d exprimé en kg

équivalent d'un indicateur de catégorie ;

Q_s : Quantité de la substance s émise.

$FC_{i,d}$: Facteur de caractérisation de dommage reliant la catégorie intermédiaire i à la catégorie de dommage d ;

4.4. Interprétation des résultats

La phase d'interprétation consiste à évaluer la fiabilité des résultats de l'étude, et les hypothèses telles que l'unité fonctionnelle, les objectifs, et le champ de l'étude. Cette phase ne se base pas uniquement sur la phase précédente (évaluation des impacts), elle intervient à chacune des trois phases précédentes. Elle permet de valider les différentes phases et d'identifier les éventuels problèmes rencontrés au cours de l'étude. Cette phase a aussi pour but de montrer les limites et les vulnérabilités de l'étude. Les données manquantes, incomplètes, ou de ressources ou qualité incertaine doivent être identifiées et justifiées.

On se basant sur les conclusions de l'étude, dans cette phase, nous procédons à la mise en œuvre de recommandations, chercher des moyens d'amélioration, et déterminer les perspectives du future. Le but principal de cette phase reste d'offrir les moyens et les informations nécessaires pour la prise de décision environnementale, qui est le but ultime de l'ACV.

5. Les catégories d'impact

Dans l'ACV, il existe plusieurs catégories d'impact sur lesquelles les praticiens peuvent travailler (comme il a été expliqué dans le paragraphe III.4.3.3). Dans la présente étude, et pour des raisons techniques, il ne sera pris en considération que trois catégories.

5.1. Utilisation des ressources

L'utilisation des ressources est divisée en deux catégories ; la demande de matériau cumulée et la demande d'énergie cumulée. Cette dernière est divisée à son tour en deux : la consommation d'énergie, qui exprime la quantité d'énergie primaire fossile (gaz, pétrole et charbon) utilisée dans le processus pour produire de la chaleur ; et la demande d'énergie, qui

exprime la quantité d'énergie utilisée comme matière première (comme le cas du gaz naturel qui est utilisé pour produire l'ammoniac).

5.1.1. Demande d'Énergie Cumulée (DEC)

C'est une mesure de la quantité totale des ressources énergétiques (énergies primaires) nécessaires pour livrer un produit ou un service ; la DEC peut être divisée entre la partie des énergies primaires renouvelables et non renouvelables (GEMIS 47, 2011).

5.1.2. Demande des Matériaux Cumulé (DMC)

Une mesure de la quantité totale de matières premières nécessaires pour livrer un produit ou un service. Dans GEMIS, la DMC est le complément important à la DEC (GEMIS 47, 2011).

5.2. Le Potentiel de Réchauffement Global (PRG)

En équivalent dioxyde de carbone, c'est la contribution à l'absorption atmosphérique du rayonnement infrarouge par les gaz de provenance anthropique, tels que CH₄, CO₂ et N₂O, conduisant à une augmentation de la température mondiale. Habituellement, les données PRG se réfèrent à un horizon temporel de 100 ans (GEMIS 47, 2011 ; Hauschild, Potting, 2005 ; Sporyshev, Kattsov, 2006).

5.3. Le Potentiel d'Acidification (PA)

En équivalent de dioxyde de soufre, l'acidification couvre le problème des «pluies acides» qui réduit la productivité des écosystèmes naturels (forêts) ou artificiels (cultures). Les infrastructures humaines (bâtiments, véhicules) sont également affaiblies par ce phénomène (Harrison R.M, 2001 ; Guinée et al., 2002).

5.4. Le Potentiel Précurseur d'Ozone Troposphérique (PPOT)

En équivalent de Composés Organiques Volatils Non Méthane (COVNM), est l'équivalent basé sur la vitesse de formation de l'ozone à partir des précurseurs, mesuré par l'équivalent de précurseurs d'ozone. Le PPOT représente potentiellement la formation d'O₃

près du sol (troposphérique) qui peut causer le phénomène du «*Smog Summer*» (GEMIS. 47, 2011 ; Osman et Ries, 2007 ; EEA, 2001).

Chaque catégorie d'impact, ou sous-catégorie le cas échéant, possède sa propre méthode de caractérisation. Cette dénomination désigne le lien existant entre l'indicateur de catégorie, le modèle de caractérisation et les facteurs de caractérisation (Guinée et al., 2002 ; Pennington et al., 2004). Les facteurs considérés dans cette étude sont présentés dans le tableau 9 :

Tableau 9. Les facteurs d'émission pour chaque catégorie d'impact (GEMIS. 47, 2011)

PRG		PA		PPOT	
CO ₂	1	NO _x	0.696		
CH ₄	25	SO ₂	1	CH ₄	0.014
N ₂ O	298	H ₂ S	1.8797	NO _x	1.22
Perfluoromethane	7 390	HCl	0.878	CO	0.11
Perfluoroethane	12 200	HF	1.601	NMVOG	1
		NH ₃	1.880		

6. Les méthodes d'évaluation d'impact dans l'ACV

Les méthodes d'évaluation des impacts de cycle de vie visent à relier, autant que possible chaque résultat d'inventaire de cycle de vie aux impacts environnementaux correspondants (Leroy, 2009 ; Guinée et al., 2002). Les résultats de l'inventaire sont classés en catégories d'impact. L'indicateur de catégorie peut être situé à n'importe quel point entre les résultats de l'ICV et la catégorie de dommage dans la chaîne de cause à effet (Guinée et al., 2002). Dans ce cadre, deux grandes écoles de méthodes sont développées :

a) méthodes orientées problèmes « *midpoint* » : qui limitent la modélisation quantitative à un stade relativement précoce de la chaîne de cause à effet pour limiter les incertitudes et grouper les résultats selon les thèmes comme le changement climatique ou l'écotoxicité (Bidder-Sin et al., 2007).

b) Méthodes orientées dommages « *endpoint* » : qui essaient de ramener la modélisation de la chaîne de cause à effet jusqu'aux dommages, souvent avec une haute incertitude (Bidder-Sin et al., 2007).

6.1. La méthode : Impact 2002+

La méthode Impact 2002+ est développée par l'Institut Fédéral suisse de Technologie

de Lausanne (EPFL). Cette méthode propose une mise en œuvre possible d'une approche problème/dommage combinée. Le schéma global de la méthode lie tous les types de résultats de l'ACV via 14 catégories de problèmes (toxicité humaine, effets respiratoires, rayonnements ionisants, déplétion de la couche d'ozone, oxydation photochimique, écotoxicité aquatique, écotoxicité terrestre, acidification terrestre/nitrification, acidification aquatique, eutrophisation aquatique, occupation des sols, réchauffement global, énergie non renouvelable, l'extraction minière), à quatre catégories de dommages : Santé humaine ; Qualité de l'écosystème ; Changements climatiques ; et Ressources) (Impact 2002+, 2014).

6.2. La méthode : CML

Une méthode d'ACV orientée problèmes est développée par l'Institut des sciences environnementales de l'Université de Leiden (CML). Elle se concentre sur une série de catégories d'impact environnemental exprimé en termes d'émissions dans l'environnement ou l'utilisation des ressources. Elle permet d'établir une valeur monétaire artificielle (prix fictif) pour chaque unité d'impact environnemental et de comparer les résultats pour les différentes catégories d'impact environnemental avec l'autre. Les catégories d'impacts utilisées dans CML sont : la diminution des ressources abiotiques, les impacts de l'utilisation des sols, le changement climatique, la destruction d'ozone stratosphérique, la toxicité humaine, l'écotoxicité (écotoxicité aquatique d'eau douce, marine, écotoxicité terrestre), la formation des photooxydants, l'acidification et l'eutrophisation (CML, 2007 ; Crettaz et al., 2010).

6.3. La méthode : Eco-Indicator 95 et 99

Eco-Indicator 99 est une méthode d'évaluation des impacts de cycle de vie orientée dommage, elle se concentre sur trois catégories : dommages sur la santé humaine ; la qualité des écosystèmes ; et ressources naturelles. Les résultats de ces trois catégories peuvent être combinés en une seule partition en utilisant des facteurs de pondération par défaut, sinon, les résultats peuvent être présentés sous forme graphique en utilisant l'outil triangle (Eco-Indicator 99, 2000).

Les données d'impact dans Eco-Indicator sont pondérées selon un processus d'évaluation sociale. Par exemple, la méthode Eco-Indicator 95 définit qu'une mort sur 1 000 000 d'habitants équivaut à 5 % de perte de surface dans un écosystème intact. Cette

pondération permet de comparer différents types d'effets environnementaux. Les résultats peuvent ensuite être présentés sous la forme d'un score unique, le score Eco-Indicator. Les facteurs d'impact pour l'Eco-Indicator 99 sont collectés et publiés dans un tableur par l'Institut des sciences environnementales, Université de Leiden, Pays-Bas, et sont fournis par Pré Consultants, éditeur du logiciel SimaPro (Solidworks, 2014).

6.4. La méthode : EDIP

La méthode danoise pour la conception environnementale pour les produits industriels (EDIP) a été élaborée dans la période entre 1991-1996 par une équipe comprenant : cinq grandes entreprises danoises dans l'industrie électromécanique, la Confédération des industries danoises, l'Institut de développement de produits (chef de projet), et l'Agence de protection de l'environnement danoise (sponsor). Cette collaboration entre les trois acteurs, l'industrie, l'université et les autorités a fourni, l'équilibre entre les besoins de l'opérationnalité et la profondeur scientifique des méthodes tout au long du projet. La méthode est en conformité avec les exigences de la norme ISO 14040 et les normes qui l'ont suivie. La méthode ne contient pas d'exigences pour les rapports et les évaluations externes. Cependant, c'est la raison pour laquelle elle est conçue pour l'utilisation interne dans le développement de produit et non pas à des fins d'information externe ou de commercialisation (EDIP, 1999).

6.5. La méthode EPS

La méthode EPS 2000 « *Environmental Priority Strategies in Product Design* » est une méthode orientée dommage. Dans le système EPS, la volonté de payer pour restaurer les changements dans les sujets de « *safe guard* » est choisie comme mesure monétaire. L'unité de l'indicateur est ELU (Environmental Load Unit), qui comprend la caractérisation, la normalisation et la pondération. Le développement de haut en bas du système EPS a conduit à une hiérarchie franche entre ses principes et ses règles (EPS, 2014).

La méthode par défaut de l'EPS 2000 est une mise à jour de la version de 1996. Les catégories d'impacts sont identifiées à partir de cinq sujets de « *safe guard* » : la santé humaine, la capacité de production des écosystèmes, les ressources des stocks abiotiques, la biodiversité, les valeurs culturelles et récréatives. Tous les facteurs de caractérisation de cette méthode sont inscrits pour le sous-compartiment «non spécifié» de chaque compartiment

(matières premières, air, eau, sol) et donc applicable sur tous les sous-compartiments, où aucune valeur spécifique de caractérisation n'est spécifiée. Cette méthode n'est pas entièrement adaptée pour les données d'inventaire de la bibliothèque de « *ecoinvent* » et « *USA IO Database 98* » ; elle omet donc les émissions qui auraient pu être incluses dans l'évaluation d'impact (EPS, 2014).

6.6. La méthode TRACI

TRACI (Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts) est une méthode autonome développée par l'Agence américaine de protection de l'environnement en particulier pour les États-Unis en utilisant des paramètres d'entrée compatibles avec les emplacements des États-Unis. La spécificité du site est disponible pour la plupart des catégories d'impact, mais dans tous les cas une valeur moyenne américaine existe lorsque l'emplacement est indéterminé (TRACI, 2014).

TRACI facilite la caractérisation des facteurs de stress environnementaux qui ont des effets potentiels, y compris la couche d'ozone, réchauffement global, l'acidification, l'eutrophisation, la formation d'ozone troposphérique (smog), l'écotoxicité, les effets liés à des critères de santé humaine, les effets cancérigènes de la santé humaine, les effets non cancérigènes pour la santé humaine, épuisement des carburants fossiles, et les effets d'utilisation des terres. TRACI a été initialement conçu pour une utilisation avec l'ACV, mais il est prévu de trouver une application plus large à l'avenir (TRACI, 2014).

7. Les bases de données

7.1. EcoInvent

La base de données d'ICV Ecoinvent est élaborée par le centre suisse pour l'inventaire de cycle de vie « SCLCI », elle constitue la base de projets d'ACV, d'écoconception, et les informations environnementales. Avec plusieurs milliers d'ensemble de données d'ACV dans les domaines de l'agriculture, l'approvisionnement en énergie, les transports, les biocarburants et les biomatériaux, produits chimiques spéciaux, les matériaux de construction, les matériaux d'emballage, métaux de base et précieux, la transformation des métaux, TIC et l'électronique ainsi que le traitement des déchets, « *ecoinvent* » demeure la base de données internationale

d'ACV la plus complète (ESU-Service, 2014).

En Mai 2013, le Centre a publié la dernière version de sa base de données d'ICV « Ecoinvent V3 ». Fidèle à ses valeurs fondamentales, le Centre a créé une base cohérente et transparente. Cette version de la base de données ecoinvent ne contient pas uniquement des données de haute qualité, mais en plus elle contient des modèles et des ensembles de données entièrement nouveaux (Ecoinvent, 2014).

7.2. BUWAL 250

Spécialisé dans les matériaux d'emballage (plastique, carton, verre, acier, aluminium, et autres) et les processus qui leur sont liés (consommation d'énergie, transport, traitement des déchets). Réalisé par le Bureau Fédéral Suisse pour l'Environnement, l'inventaire inclut les émissions de production de matière première, de production énergétique, de production de coproduit et de matériaux auxiliaires, de transports et de procédé de production de matériaux (BUWAL 250 Library, 2014).

7.3. US-IE

Cette base de données a été créée pour combler l'écart actuel dans la base de données US LCI, et pour appliquer les conditions électriques des États-Unis à la base de données ecoinvent. L'ensemble des données comprend des processus modifiés pour les 423 processus contenus dans la base de données US LCI et pour les 3974 unités et procédés contenues dans la base de données ecoinvent (EarthShift, 2014).

7.4. US LCI

US LCI a été créé par NREL et ses partenaires pour aider les experts d'ACV à trouver les réponses à leurs questions en termes d'impacts environnementaux. Cette base de données fournit une comptabilité de "berceau à la tombe" des flux d'énergie et de matériaux entrants et sortant de l'environnement qui sont associés à la production d'un matériau, un composant ou assemblage. Il s'agit d'une chambre de stockage on line des données recueillies sur les matériaux couramment utilisés, les produits et les processus (USLCI, 2014).

8. Les logiciels d'ACV

Plusieurs compagnies et instituts de recherche ont développé des logiciels pour les utiliser en ACV. Le but principal pour cela est la grande quantité de données qu'il faut enregistrer et traiter pour la réalisation d'une étude ACV. Plusieurs logiciels ont été développés pour réaliser une ACV complète, par exemple : réaliser des inventaires, l'évaluation d'impact et quelques types d'interprétations sont accomplis, tandis que d'autres sont seulement capables de réaliser la phase d'inventaire de l'ACV.

Plusieurs des logiciels développés sont commercialisés sur le marché avec des prix qui varient entre 800 et 4000 dollars, et dont les versions de démonstration sont disponibles pour évaluation, mais avec des limites. Comme les logiciels présentent un investissement, les acheteurs potentiels sont conseillés de collecter un maximum de données sur les différents systèmes afin de les comparer avec leurs besoins.

8.1. GEMIS

Le logiciel GEMIS 4.7 (2010) est un logiciel libre, qui permet d'évaluer les impacts des produits sur l'environnement. Il contient d'une part une méthodologie d'évaluation des impacts et d'autre part une base de données de matériaux, procédés de fabrication, moyens de transport, énergies, permettant de modéliser le produit. La base de données comprend une liste de produits, de processus et de scénarios. Nous pouvons introduire nos propres produits, processus et scénarios. La base de données intégrée est basée sur les références Suisses BUWAL et ETH et Allemandes GTZ. Dans une ACV, la méthode d'analyse des impacts environnementaux du système étudié se décompose en deux étapes. L'étape d'affectation des flux issus de l'Inventaire du Cycle de Vie (ICV) à des impacts environnementaux, tandis que la méthode de caractérisation pondère ces mêmes flux à l'intérieur de chacune des classes d'effet (GEMIS 4.7, 2011).

8.2. SimaPro

SimaPro est un logiciel commercial, développé par la société Hollandaise « Pré Consulting » en 2000, il contient 7000 modules dans sa base de données. L'avantage de ce logiciel est qu'il contient plusieurs bases de données environnementales, dont la plus riche et

la plus complète « *Ecoinvent* » (SimaPro, 2014). Plusieurs méthodes d'évaluation d'impact sont disponibles dans SimaPro, des méthodes monocritère, multicritères, des méthodes d'indicateurs de flux, ou d'indicateurs d'impacts, des méthodes destinées à vulgariser les résultats pour les rendre compréhensibles et accessibles au grand public, d'autres plus complexes destinées à un public d'experts. En plus de son évaluation d'impact selon la méthode « *Impact 2002+* », SimaPro utilise différentes méthodes de calculs tels que « *CML1992* » et « *Eco-indicateur 99* » (Jolliet et al., 2003). SimaPro est le logiciel le plus utilisé et le mieux adapté à une présentation simple des résultats d'inventaire et d'analyse d'impacts, permettant d'examiner rapidement les conditions détaillées de chaque processus unitaire (Hajjaji, 2011).

8.3. TEAMTM

TEAMTM représente un outil puissant et flexible développé par la société française « *EcoBilan* ». La sélection et la définition des entrées et sorties sont simples en utilisant la barre d'outils du logiciel. L'utilisation de formules pour spécifier les méthodes d'allocation pour chaque unité de traitement est une fonctionnalité unique de TEAMTM. Le calcul d'inventaire d'ACV n'importe où dans le système est une autre fonctionnalité flexible de TEAMTM. Le modèle contient dix catégories contenant 216 fichiers de données individuelles pour les produits et la production de matériaux, production d'énergie et de transport. Les catégories sont : les tissus mous et le papier ; la pétrochimie et les plastiques ; les produits chimiques inorganiques ; l'acier ; l'aluminium ; autres métaux ; le verre ; la conversion d'énergie ; le transport ; et la gestion des déchets. Cet outil utilise des formules et des variables qui permettent le développement d'un système dynamique qui facilite l'analyse de sensibilité. La sortie de l'inventaire est affichée sous forme de tableau à travers le modèle "*Eco-view*" (Ecobilan, 2014).

8.4. GABI

GABI est un logiciel de calcul de bilans holistiques élaboré par « *PE international* » et l'Université de Stuttgart. Au départ, le logiciel était orienté pour l'industrie d'automobile ; aujourd'hui il est utilisé dans plus de 18 industries. Grâce à sa base de données, GABI permet la réalisation des inventaires et l'évaluation des impacts environnementaux. GABI peut être

utilisée pour l'évaluation environnementale, l'écoconception, la rationalisation de la consommation d'énergie ou pour la prise de décision environnementale stratégique. Il est disponible en Anglais et en allemand, il est utilisé par plus de 1 500 entreprises dans le monde (GABI, 2014).

8.5. CMLCA

CMLCA est un logiciel développé par « *Institute of Environmental Sciences, Leiden University* ». CMLCA est utilisé dans les études d'ACV, y compris l'Analyse du Cycle de Vie sociale (ACVS) et l'Analyse de la Durabilité du Cycle de Vie (ADCA), l'analyse d'Entrée-Sortie (AES), l'Analyse des Entrées-Sorties de l'Environnement (AESE), cout de cycle de vie (CCV), l'Analyse d'éco-Efficacité (AEE) de l'ACV hybride qui combine l'ACV avec l'AESE. CMLCA est capable de calculer des boucles dans les procédés et permet également des règles d'imputation relativement compliquées (CMLCA, 2014).

8.6. ECOLAB

EcoLab est un programme d'ACV suédois qui a été utilisé principalement dans l'industrie suédoise. L'entreprise Andrae a utilisé EcoLab pour explorer l'applicabilité de l'ACV en emballage de la microélectronique. Le principal avantage d'EcoLab est sa base de données relationnelle faisant la réutilisation très facile des composants/modules (Andrae, 2010).

La base de données « *Oracle* » unique contient toutes les activités, les scénarios d'organigrammes, les processus, les scénarios du cycle de vie, et la nomenclature des substances et elle n'a pas de «projets de bibliothèque» ou «projets» comme dans SimaPro. En outre, pour chaque analyse, les résultats de toutes les méthodes d'impact et de pondération peuvent être visualisés.

8.7. ECOPRO

EcoPro est un logiciel allemand développé par « *L'Institut de conception et d'ingénierie logistique* » et qui fonctionne avec Windows, cet outil s'adresse aux architectes et ingénieurs. Il aide à la prise de décisions concernant les solutions fonctionnelles et constructives et le

choix des matériaux. ECOPRO utilise les mêmes données que pour la planification des coûts. Un élément est composé de plusieurs couches ayant des caractéristiques matérielles. Par conséquent liés à l'énergie des valeurs telles que la conductivité, la masse, la durée de vie de la couche, les catégories de déchets et l'impact environnemental et des critères de coûts sont associés à chaque couche et ensuite ajoutés pour chaque élément et pour trois phases du cycle de vie (construction, rénovation, élimination). Le logiciel contient plus de 1000 modules dans sa base de données (EcoPro, 2014).

8.8. PEMS

PEMS est un logiciel d'ACV développé par l'entreprise anglaise « *Pira International* ». L'interface graphique de PEMS rend le développement du système de manière intuitive très facile. Les entrées et sorties sont compilées et un bilan de masse pour chaque bloc de traitement est calculé et présenté à l'utilisateur sur chaque carte de propriétés. Les flux de matières et de transport sont représentés par des flèches entre les blocs. Les champs descriptifs vastes permettent à l'utilisateur d'offrir l'information descriptive pour tous les blocs de processus et le système dans son ensemble. Les données développées par l'utilisateur sont toutefois difficiles pour entrer dans le format de base de données, et le système d'archivage pour la réutilisation est fastidieux. La flexibilité de l'unité et les capacités d'allocation de l'outil sont typiques de la plupart des logiciels, les données doivent être saisies dans les unités définies du système. Enfin, la manipulation et la présentation des données sont bien prises en charge par le système. L'analyse de sensibilité, l'évaluation de l'impact, et la comparaison des résultats sont faciles à comprendre et à personnaliser. Les tableaux et graphiques peuvent être facilement personnalisés, et l'exportation vers d'autres applications est bien prise en charge (PEMS, 2014).

8.9. UMBERTO

UMBERTO est un logiciel puissant développé par l'institut allemand d'énergie et de recherche environnementale de Hambourg. Umberto est un outil puissant pour modéliser, calculer et visualiser les systèmes de flux de matières et d'énergie. Il est utilisé pour analyser les systèmes de production, que ce soit pour une unité ou une entreprise entière, ou, le long d'un cycle de vie du produit. Les résultats peuvent être évalués à l'aide d'indicateurs de

performance économiques et environnementaux, tels que l'empreinte carbone. Les données de coûts pour les matériaux et les processus peuvent être liées à des indicateurs environnementaux afin de mieux soutenir la prise de décisions de gestion. Umberto est aussi un outil flexible et polyvalent pour des études d'analyse de flux matériel ou pour l'évaluation du cycle de vie (ACV) des études de produits (UMBERTO, 2014).

CHAPITRE 3

ANALYSE DE CYCLE DE VIE DES FERTILISANTS AZOTÉS

1. Objectif et champ d'étude

1.1. Objectif de l'étude

Cette partie de l'étude, envisage la quantification et l'évaluation des émissions des polluants au cours des diverses étapes qui composent le cycle de vie des produits fertilisants, et qui ont comme matière première l'ammoniac anhydre liquide obtenu par la synthèse de l'azote de l'air et l'hydrogène du gaz naturel extrait du champ gazier de Hassi R'mel au sud de l'Algérie.

Dans ce chapitre, nous avons comme objectif, l'évaluation de l'impact généré par la production de deux fertilisants azotés, le premier est appelé Calcium Ammonium Nitrate (CAN) à 27% d'azote, et le deuxième est le Sulfazot à 26% d'azote et 35% de Trioxyde de soufre.

Les objectifs de l'étude peuvent être résumés comme suit:

- Établir un inventaire complet des entrées et des sorties ;
- Identifier les flux élémentaires échangés par le système objet d'étude avec l'environnement ;
- Évaluation des impacts et des aspects environnementaux liés à chaque phase de production ;
- chercher les meilleures procédures à prendre pour éliminer ou minimiser ces impacts.

1.2. Champ d'étude est frontière de système

Le système étudié fonctionne sur deux sites industriels différents, séparés par près de 800 km (extraction et traitement du gaz naturel dans le premier et production des fertilisants dans le second), qui exige un transfert de gaz par gazoduc. L'étude est menée à partir de l'extraction de gaz naturel jusqu'à la mise en vente du produit fini, ce type d'étude est appelé

du "Berceau à la Porte". La première phase de vie prise en compte est la phase d'extraction de la matière première ; elle englobe l'extraction du gaz naturel des puits, la compression, la liquéfaction et la séparation. La phase de transport se résume au transfert du gaz naturel par gazoduc. La dernière phase est la phase de production, elle s'étend de la production de l'ammoniac, de l'acide nitrique, de la solution nitrate à la production de CAN et de Sulfazot.

Une modélisation primaire peut se faire sous la forme d'un arbre de synthèse des processus pour donner un aperçu du système étudié et les différentes étapes qui composent le cycle de vie. La figure ci-dessous (Figure 19) illustre les différents processus unitaires de chacun des fertilisants objets de l'étude. Pour prendre en compte les matériaux et l'énergie ainsi que les impacts sur l'environnement, deux limites du système ont été définies pour cette analyse.

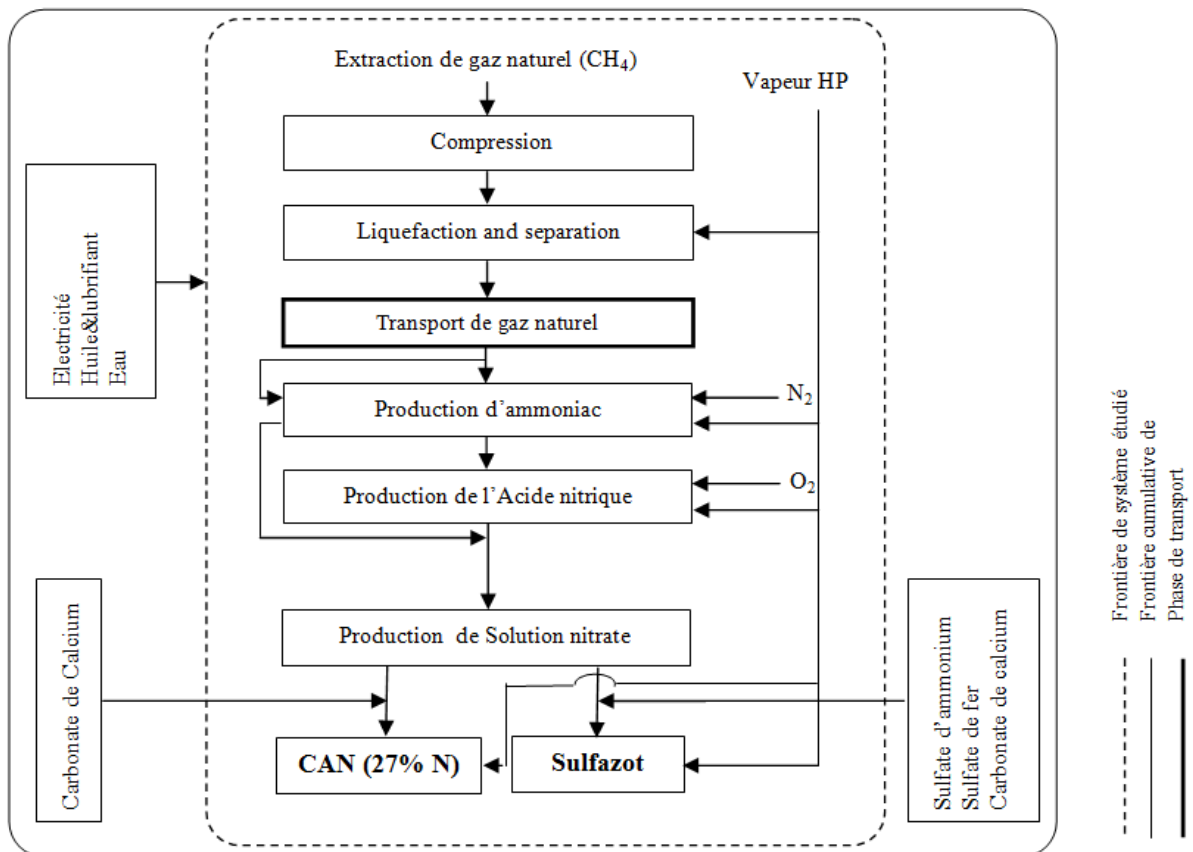


Fig. 19. Frontière de système de production des fertilisants azotés (Sulfazot & CAN)

La frontière cumulative de système (cadre avec ligne discontinue) présente les matériaux, la consommation d'énergie et les émissions associées de tous les processus. La deuxième frontière (cadre avec ligne continue) est la limite du système étudié ; cette seconde

frontière présente les processus pour lesquels des données primaires ont été recueillies directement auprès des unités de production. La phase de transport (cadre avec ligne grasse) sépare les opérations menées dans les sites de production.

1.3. L'unité fonctionnelle

L'unité fonctionnelle choisie dans cette étude est la production d'une tonne de fertilisant issue des différentes phases de production (de l'extraction du gaz naturel jusqu'à la mise en vente de produit fini).

2. Analyse de l'inventaire

2.1. Qualité des données

Les données utilisées dans cette recherche ont été récoltées suite à une analyse descriptive des processus existants de toutes les unités de production.

Les données de production utilisées dans l'inventaire d'entrée et qui concernent la phase de production des fertilisants sont des données primaires, elles ont été récoltées directement depuis les unités de production ou de la direction de production de l'entreprise « FERTIAL-Annaba ». Ces données sont relatives à l'année 2010, cette entreprise a été choisie comme référence grâce à la qualité, à l'exactitude et au contrôle réservés aux données, car en 2010, l'entreprise FERTIAL-Annaba s'est engagée dans le projet de certification ISO14001.

Pour les données des processus amont (extraction de gaz naturel), nous avons utilisé des données collectées directement des sites de production, mais ces données sont des estimations de la consommation journalière effectuée par le producteur ; les consommations annuelles, figurant dans les tableaux d'inventaire de la phase d'extraction matière première, sont calculés sur cette base.

Les données de la phase de transport de gaz naturel et les données d'entrée pour les processus auxiliaires, utilisées comme des intrants dans la production des fertilisants, sont secondaires (nous avons utilisé les données génériques récupérées de la base de données du logiciel GEMIS 4.7).

2.2. Description du système de production des fertilisants azotés

2.2.1. Phase d'extraction du gaz naturel

La zone d'exploitation du gaz naturel de Hassi R'mel est située dans le Sud de l'Algérie, à 525 km au Sud d'Alger, dans la Wilaya de Laghouat, à 70 km à l'Ouest de Berriane, à 120 km au Nord-Ouest de Ghardaïa et à 120 km au Sud-Est de Laghouat.

Le complexe du champ de Hassi R'mel, mis en valeur dans les années soixante et mettant en évidence un gisement de gaz humide à une profondeur de 2132 m, représente la plus grande installation de traitement de gaz en Algérie.

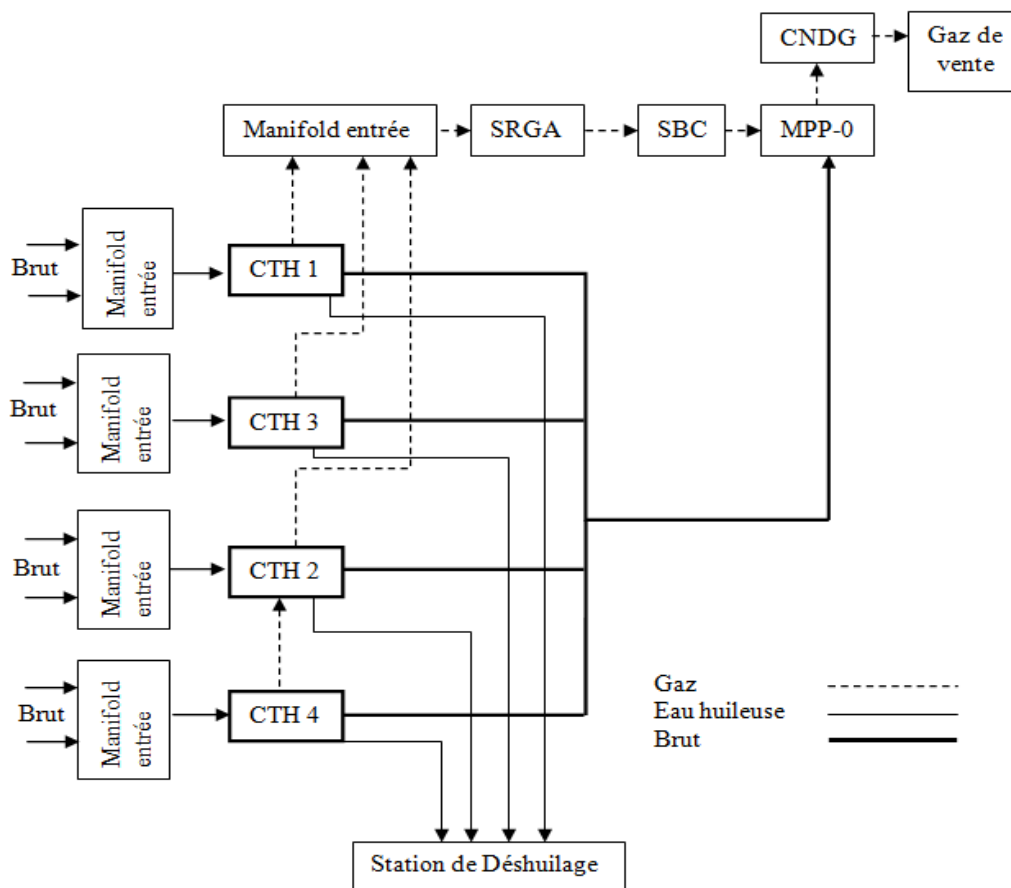


Fig. 20. Description du champ d'étude (phase d'extraction du gaz naturel)

Le champ de Hassi R'mel contient plusieurs unités de production ainsi que des procédés utilisés pour la récupération, le traitement, et l'augmentation de la pression de gaz (Figure 20). Les principales unités prises en compte dans l'étude sont :

- La récupération des gaz associés (SRGA)
- Station Boosting Centre (SBC)
- Le traitement du gaz naturel (cas d'étude MPP0)

Pour faciliter l'identification des opérations accomplies par le système et les impacts causés par chaque opération, le système a été découpé en 3 sous-systèmes : - extraction de gaz naturel, - transport par gazoduc - production des fertilisants. Le sous-système "extraction de gaz naturel" comprend plusieurs opérations unitaires ; ces opérations sont regroupées dans des fonctions comme montré ci-dessous dans le tableau 10 :

Tableau 10. Présentation du sous-système : Extraction du gaz naturel

Opérations unitaires étudiées	Nom de l'unité	Fonctions accomplies
Récupération de gaz associé ; séparation du gaz de condensat ; compression de gaz ; pompage de gaz naturel vers SBC.	SRGA	1. Extraction de gaz naturel
Séparation de gaz naturel des condensats et de l'eau ; compression de gaz ; refroidissement.	SBC	2. Compression et séparation
Déshydratation ; séparation du gaz et des hydrocarbures liquides ; stabilisation et fractionnement ; recompression des gaz MP	MPP-0	3. Liquéfaction et séparation

2.2.1.1. Station de Récupération des Gaz Associés (SRGA)

Cette station est utilisée pour la récupération de gaz séparé dans les centres de traitement d'huile. Le gaz associé est récupéré dans les quatre centres de récupération et de traitement d'huile, et acheminé par des gazoducs vers le manifold d'entrée de la SRGA à une pression de 8 bars. Le gaz comprimé sortant de la SRGA à une pression de 112 bars est expédié au travers d'un manifold de sortie par gazoduc vers la station de Boosting Center (SBC) où il rejoint le gaz provenant des puits pour que l'ensemble soit comprimé à 120 bars et expédié vers les modules MPP- 0, 1 et 4.

2.2.1.2. Station Boosting Center (SBC)

Lors de l'extraction du gaz naturel des puits, la pression chute dans le gisement, la station SBC a été réalisée dans le but de maintenir la pression du gaz brut provenant des puits d'extraction stables. La SBC est d'une capacité de production nominale de $150 \times 10^6 \text{ Sm}^3$ par

jour.

Le gaz brut en provenance des puits producteurs est un mélange d'hydrocarbures (gaz et hydrocarbures liquides) contenant une certaine proportion d'eau de gisement. Le gaz brut arrive à 94 bars, entre dans un séparateur d'admission où l'eau et le condensat sont séparés du gaz. Après cette opération, le condensat est envoyé vers les modules MPP-0, 1, 4 puis stocké au niveau de MPP-0, tandis que l'eau huileuse est acheminée vers un bassin CPI, où elle subit une séparation ; l'huile est acheminée vers MPP-0, et l'eau est envoyée vers le bassin d'évaporation étanche du module MPP- 4.

2.2.1.3. Module Processing Plant (MPP)

Le gaz arrive directement aux ballons d'aspiration des compresseurs qui servent à les protéger contre l'humidité. Le gaz entre du séparateur d'admission au compresseur afin d'être comprimé à 120 bars et refroidi par des aéroréfrigérants de 95 °C à 65 °C, puis expédié vers les modules 0, 1 et 4 selon la répartition suivante :

- MPP-0 : 19,9 % en volume du débit total.
- MPP-1 : 39,9 % en volume du débit total.
- MPP-4 : 40,2 % en volume du débit total.

* Le cas de l'étude MPP-0

La station de traitement du gaz MPP-0 est constituée de deux lignes de traitement d'une capacité de 15×10^6 Sm³/j par ligne.

Le traitement de gaz est effectué selon un procédé appelé « *PRITCHARD* » est constitué de quatre principales phases : déshydratation, séparation du gaz des hydrocarbures liquides, stabilisation et fractionnement, et enfin recompression de gaz moyenne pression.

A la sortie de MPP-0, le gaz produit est envoyé vers GZ-0 et CNDG, et le pétrole brut sont expédiés vers une station de pompage appelée SP4.

2.2.2. Phase de transport du gaz naturel

Une fois extrait et traité, le gaz naturel est transporté pour la commercialisation par gazoduc. En premier lieu, le gaz produit est acheminé vers le Centre National de Dispatching de Gaz (CNDG) à Hassi R'mel.

À partir du CNDG, le gaz est distribué vers les différents gazoducs qui partent du champ, avec des débits et des pressions déterminés conformément aux programmes d'enlèvement des différents clients. Ces départs sont :

- GZ0, GZ 1, GZ 2 et GZ 3 vers Arzew.
- GK 1 et GK 2 VERS Skikda.
- GG1 vers Alger (la station de production d'électricité de Cap Djennete).
- GEM gazoduc « Enrico Mattei » ex GO 1 GO 2 vers l'Italie via la Tunisie.
- GPDF Gazoduc « Pedro Duran Farel » ex GLE Gazoduc Maghreb Europe vers l'Espagne.

L'alimentation du complexe de production des fertilisants et des produits chimiques Fertial-Annaba par gaz naturel est assurée par les gazoducs GK 1 et GK 2.

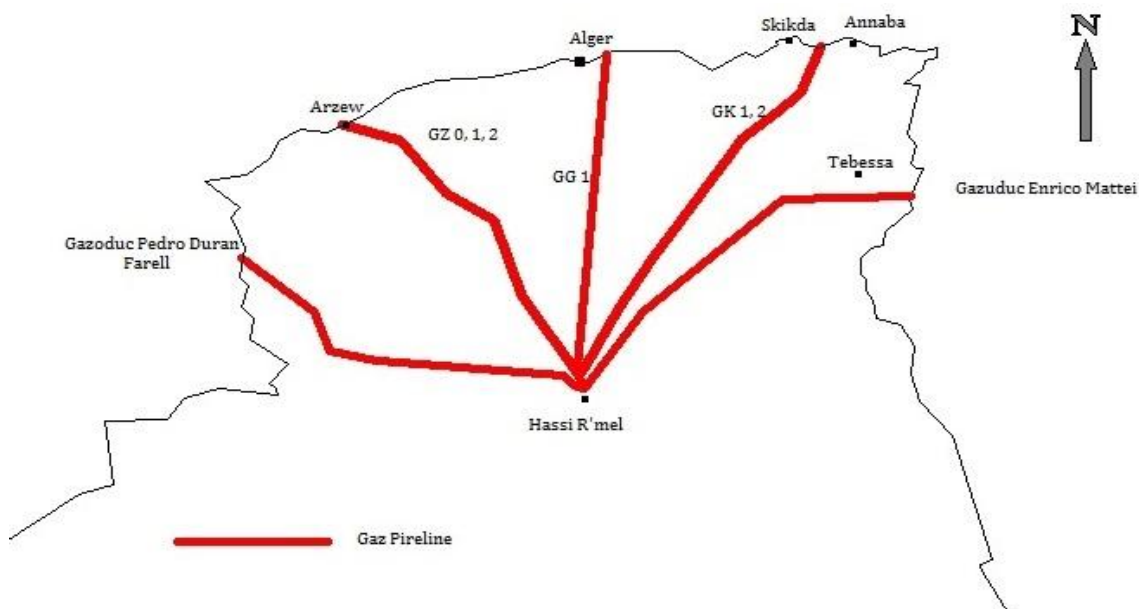


Fig. 21. Transport et distribution du gaz naturel à partir du Champ de Hassi R'mel

2.2.3. Phase de production des fertilisants azotés

Le complexe de production des fertilisants et des produits chimiques Ferial-Annaba assure la production d'une grande gamme de fertilisants comme il a été mentionné dans le chapitre 1. En plus des fertilisants, le complexe assure la production de plusieurs produits chimiques nécessaires à la production des fertilisants dont l'ammoniac est le plus important. Comme les autres, le sous-système « Production des fertilisants » comprend plusieurs opérations unitaires qui sont regroupées dans des fonctions, le tableau 11 donne la description.

Tableau 11. Présentation du sous-système : Production des fertilisants azotés

Opérations unitaires étudiées	Fonctions accomplies
Compression et désulfuration du gaz naturel ; préparation du gaz de synthèse ; purification de gaz de synthèse ; synthèse d'ammoniac.	1. Production d'ammoniac
Filtration et compression de l'air ; évaporation de l'ammoniac et mélange (O ₂ -NH ₃) ; filtration du mélange (NH ₃ -Air) et conversion de l'ammoniac ; chaudière de récupération (groupe de génération de vapeur) ; oxydation-absorption et blanchiment.	2. Production d'acide nitrique
Neutralisation du mélange (NH ₃ / HNO ₃) ; 1 ^{ère} concentration à 77% ; 2 ^{ème} concentration à 99.8% ; mélange Dolomite\ Nitrate d'Ammonium ; prilling ; refroidissement ; criblage ; enrobage.	3. Production de Calcium Ammonium Nitrate*
Neutralisation ; granulation ; séchage ; classification ; refroidissement ; enrobage ; ensachage ; stockage de produit fini.	4. Production des fertilisants
Dessalement de l'eau de mer. Déminéralisation de l'eau dessalée ; production de vapeur.	5. Production de vapeur haute pression

* Pour la 3^{ème} fonction (production de Calcium Ammonium Nitrate), les opérations unitaires sont pour la production de « CAN ». La production des fertilisants ne nécessite que la solution nitrate (Ammonitrate), cette dernière est obtenue dès la 2^{ème} concentration du mélange (NH₃/ HNO₃).

2.2.3.1. Production d'ammoniac

Le gaz naturel (CH₄) est la matière première principale utilisée pour la production d'ammoniac. La méthode conventionnelle de production d'ammoniac est le procédé de production « Haber-Bosch ».

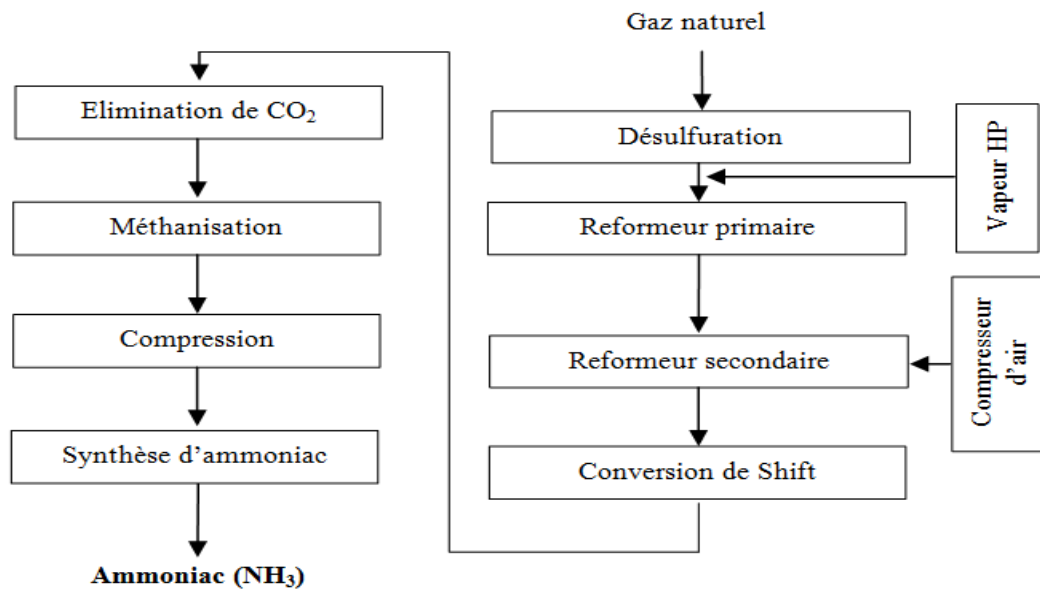


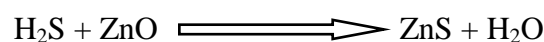
Fig. 22. Description du procédé de production d'ammoniac

Le gaz d'alimentation arrive par gazoduc à une pression de 19 bars et une température de 42 °C. La figure 22 montre les différents entrants dans le procédé.

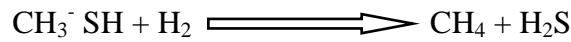
a. Compression et désulfuration du gaz naturel

Le gaz d'alimentation entrant à l'unité de production d'ammoniac entraîne des particules liquides, ces particules sont extraites du gaz dans le séparateur et évacuées vers les égouts. Le gaz sort du séparateur et rentre dans le compresseur de gaz d'alimentation pour augmenter sa pression jusqu'à 41 bars, puis mélangé avec du gaz riche en hydrogène venant du compresseur de gaz de synthèse. Le gaz est ensuite préchauffé dans un préchauffeur à une température de 400 °C, et dirigé vers le réacteur de désulfuration qui est composé de deux lits catalytiques. Le lit inférieur est en oxyde de zinc (ZnO), il est utilisé pour extraire le soufre sous forme de H₂S du gaz de procédé, et le lit supérieur est un catalyseur d'hydrogénation à base Cobalt-Molybdène (Co-Mo) :

- Lit catalytique inférieur : un réactif à base de zinc qui joue le rôle de l'absorbeur des composés sulfureux :



- Lit catalytique supérieur : un catalyseur d'hydrogénation à base Cobalt-Molybdène :



b. Préparation du gaz de synthèse

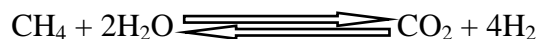
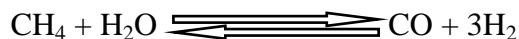
Le gaz de procédé (synthèse) est préparé en trois étapes principales :

- Reforming primaire
- Reforming secondaire
- Conversion shift (CO en CO₂)

i. Reforming primaire

Le gaz issu de la désulfuration ne contient pas plus de 25 ppm de soufre, et 9,5% de méthane non converti, il est ensuite acheminé au reforming primaire dans le four, après avoir été saturé par la vapeur d'eau (la vapeur d'eau est nécessaire pour la réaction de conversion) et chauffé jusqu'à 542 °C dans le serpentin de la zone de conversion et reparti sur les tubes de catalyseurs suspendus de la section de radiation. La chaleur nécessaire pour la conversion est produite par 200 brûleurs orientés vers le bas qui fonctionnent au gaz combustible, la flamme des brûleurs est située entre les rangées des tubes de catalyseurs. La pression de gaz à la sortie du four est de 30,1 bars et sa température est de 542 °C, à cette étape, il croise l'air nécessaire au reforming secondaire dans un échangeur, où la température de l'air monte à 482 °C et celle du gaz de procédé baisse à 160 °C.

Réaction :



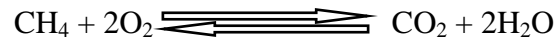
ii. Reforming secondaire

Le gaz de procédé partiellement reformé (30-40%) rencontre à l'entrée du reformeur secondaire l'air qui vient du compresseur à une température de 600 °C. Le gaz de procédé est mélangé à l'air dans un brûleur pour augmenter davantage la température. Cela est fait par combustion d'une partie du gaz de procédé avec de l'oxygène fourni par l'air, il fournit aussi l'azote nécessaire à la synthèse du produit fini. Le mélange passe ensuite sur un catalyseur de

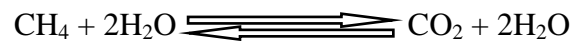
reformage secondaire contenant du nickel, la chaleur de combustion dégagée nécessaire élève la température de sortie des gaz à 994°C, et réduit la teneur en méthane de 9.58% à environ 0.33%.

- Réaction

La combustion produite sur ce lit catalytique à base de Cr₂O₃ est donnée par la réaction :



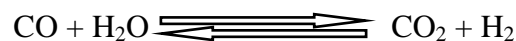
Le catalyseur dans le deuxième lit à base de Nickel qui active la réaction suivante :



iii. Conversion shift

La teneur en CO de gaz de procédé à la sortie du reforming secondaire est de 13%. Le convertisseur à haute température (HT) est conçu pour réduire la teneur en CO à 3%. Après avoir passé par la chaudière où il est refroidi par l'eau d'alimentation, le gaz de procédé à 371 °C est converti à HT grâce à un catalyseur à base de Fer-Chrome selon la réaction suivante :

- Réaction de Shift :



Le gaz est ensuite admis au convertisseur à basse température (BT) à une température de 242°C, où la teneur en CO est réduite après conversion à environ 0.5%, le gaz est à une température de 254°C, l'effluent de conversion qui contient environ 30% des gaz secs sera d'abord refroidi par préchauffage d'eau d'alimentation avant d'être introduit dans le système d'élimination de CO₂.

c. Purification de gaz de synthèse

A cette étape de production, le gaz est à 63 °C et 27 bars de pression, le gaz va subir un nouveau traitement pour éliminer le CO₂ et CO pour avoir un mélange (H₂+N₂) de grande pureté (moins de 100ppm CO + CO₂).

i. Décarbonatation

Le gaz de procédé avec une teneur en CO₂ de 17% arrive à l'absorbeur ; dans ce dernier, une solution pauvre et aqueuse en MEA va rentrer en contact avec le gaz pour absorber le CO₂, le gaz sortant de l'absorbeur ne contient plus que 10 ppm de CO₂.

ii. Méthanisation

Le gaz de synthèse purifié venant de la section de décarbonatation contient toujours de faibles quantités de CO₂ et de CO. Ces derniers sont des poisons pour les catalyseurs de synthèse de l'ammoniac, alors le gaz est envoyé au méthanateur pour compléter la purification à une pression de 25 bars et une température de 316°C. Le méthanateur contient un lit de catalyseur au Nickel très actif. Le gaz est chauffé à environ 111°C puis soumis à un deuxième chauffage pour obtenir la température de 316°C à l'entrée de méthanateur. Les réactions étant exothermiques va augmenter la température des gaz à 359°C à la sortie du méthanateur.



Le gaz sortant de méthanateur, va subir un refroidissement progressif jusqu'à 38°C puis il est envoyé vers le ballon de séparation pour séparer l'eau du gaz de synthèse.

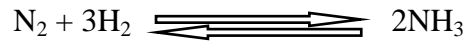
d. Synthèse d'ammoniac

i. Compression du gaz de synthèse purifié

Après refroidissement à la sortie de méthanateur, le gaz de synthèse purifié rentre dans le compresseur à une pression de 24,6 bars et une température de 38°C, il contient de H₂ et N₂ dans une proportion volumique (3/1), ainsi que du méthane et de l'Argon à une teneur de 1,2%, ces derniers sont aspirés dans le compresseur, où la pression et la température du mélange sont augmentées à environ 64 bars et 173°C.

ii. Réacteur de synthèse

avant de rentrer dans le réacteur, le gaz contenant moins de 2% de NH₃ est réchauffé progressivement jusqu'à 144°C. Le gaz passe à travers les lits catalytiques en présence de catalyseurs à base de Fer, la réaction de synthèse est exothermique :



Le gaz qui sort du réacteur (105-D) a une température de 20°C est refroidi jusqu'à 16,6°C par l'eau dans un échangeur.

iii. Réfrigération de l'ammoniac

Le système de réfrigération à trois étages permet la condensation d'ammoniac de la boucle de synthèse, et permet sa récupération avec les gaz libres, et procure le refroidissement inter étage du compresseur du gaz de synthèse. Les trois degrés de refroidissement sont respectivement 13.3, -7.2 et -33°C.

iv. Stockage de l'ammoniac

L'ammoniac liquide arrive de la section de réfrigération avec une température de -33°C et une pression de 0 bar effectif alimente le bac de stockage par sa partie supérieure sous forme de pluie pour liquéfier une partie de vapeurs dégagées par l'ammoniac déjà stocké.

2.2.3.2. Production de l'acide nitrique

L'acide nitrique (HNO₃) est obtenu à partir de l'ammoniac et de l'oxygène capturé de l'air selon le procédé Ostwald. La figure 23 montre les différentes étapes et entrants dans le procédé de production de l'acide nitrique.

a. Filtration et compression de l'air

L'air nécessaire à l'oxydation de l'ammoniac est aspiré de l'atmosphère à une température de 25°C. Avant d'entrer au compresseur, il passe dans un pré filtre à 3 microns (μ) après dans un filtre finisseur où toute particule supérieure à 1 μ est capturée.

L'air est ensuite comprimé par un compresseur bi étage à refroidissement intermédiaire. Au 1^{er} étage, la pression monte jusqu'à 3,4 bars et 150 °C. Dans le réfrigérant intermédiaire,

l'air est refroidi à 85°C par l'eau de refroidissement. Au 2^{ème} étage du compresseur, la pression finale s'élève à 7,95 bars et la température à 210 °C.

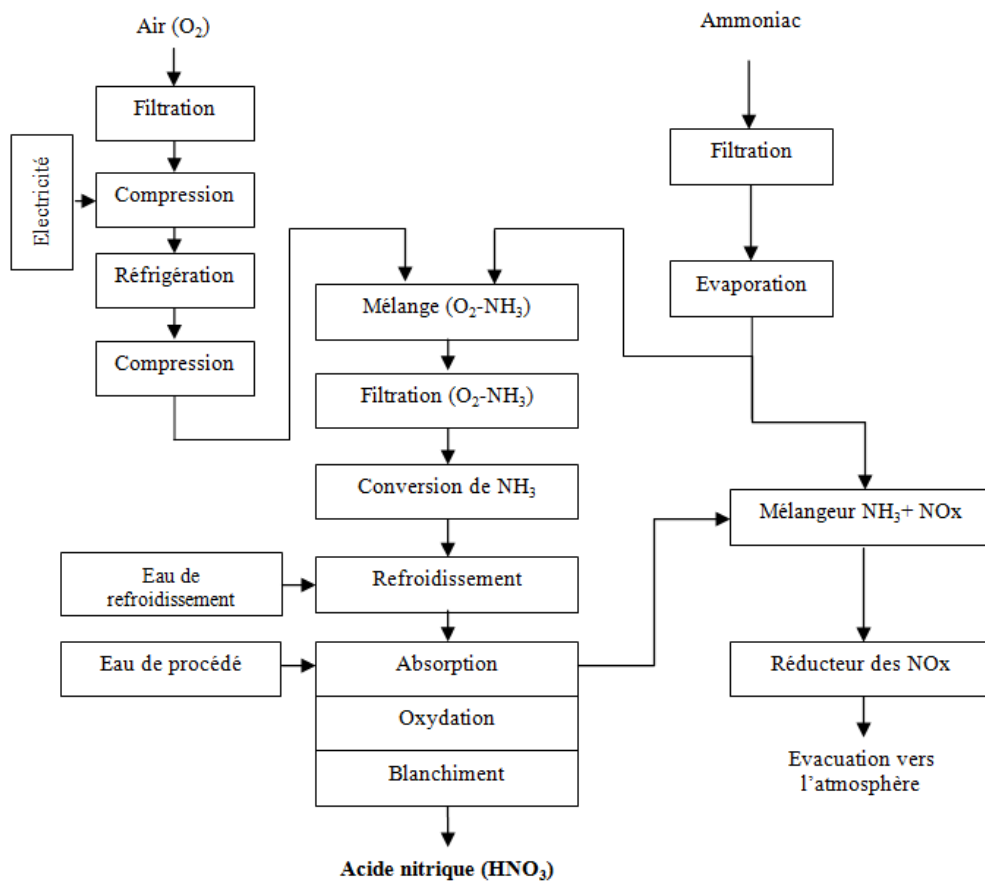


Fig. 23. Description du procédé de production de l'acide nitrique

À la sortie du compresseur, le débit d'air est partagé en deux parties :

- L'air primaire : représente 87% en volume du débit total qui est utilisé à la conversion d'ammoniac.
- L'air secondaire : représente 13% en volume du débit total qui est utilisé pour blanchir l'acide brut puis sera additionné au gaz nitreux de la colonne oxydation-absorption.

b. Évaporation de l'ammoniac et mélange air/ammoniac

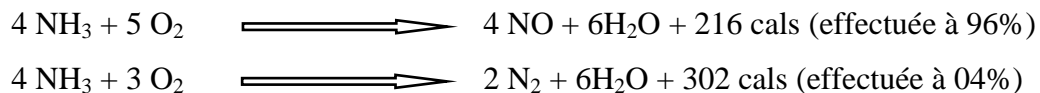
L'ammoniac au niveau de l'unité de production de l'acide nitrique est stocké sous la forme liquide à une température qui varie entre -2 et 6 °C, il contient environ 0.5% d'eau et 5ppm d'huile. Avant d'entrer à l'évaporateur, l'ammoniac passe par un filtre pour éliminer l'huile et toute particule solide. Une fois à l'évaporateur, l'ammoniac est évaporé à l'aide

d'eau déjà réchauffée. Avant de sortir de l'évaporateur, l'ammoniac est réchauffé à 35°C pour éviter l'entraînement des gouttelettes d'eau et d'ammoniac.

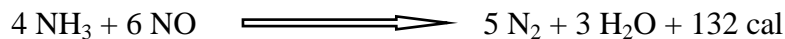
c. Filtration du mélange (NH₃-Air) et conversion de l'ammoniac

Le mélange gazeux sort du mélangeur à une température d'environ 195 °C et une pression entre 6.4 et 7 bars, il est de nouveau filtré principalement pour capturer les particules de rouilles qui peuvent se former dans les conduites.

La conversion de l'ammoniac est faite dans un réacteur de conversion en présence d'un catalyseur de platine-Rhodium. La conversion amène à la formation d'oxyde d'azote (NO) et l'azote (N₂) à une température qui varie entre 800 et 950°C selon les réactions globales suivantes :



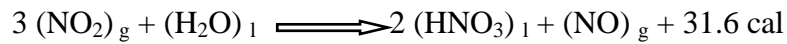
L'ammoniac non converti ayant traversé les toiles peut réagir en phase gazeuse avec l'oxyde d'azote (NO) selon la réaction suivante :



d. Chaudière de récupération (groupe de génération de vapeur)

La chaleur dégagée lors de la réaction conversion de l'ammoniac dans le réacteur de conversion est utilisée pour la génération de la vapeur dans une chaudière de récupération existant dans le réacteur.

Les gaz nitreux quittant la chaudière de récupération à une température de 200 °C arrivent au refroidisseur de gaz qui les baisse à 55 °C par échange avec l'eau de refroidissement. En conséquence de ce contact, la grande partie de la vapeur d'eau contenue dans les gaz de conversion se condense et se combine avec le NO₂ déjà formé pour produire de l'acide nitrique faible dans le fond du refroidisseur dont la concentration est de 35 à 39 % selon la réaction suivante :



L'acide faible formé quitte le refroidisseur vers le fond de la colonne d'absorption puis concentré dans cette dernière.

e. Oxydation-absorption et blanchiment

i. Oxydation

Les gaz quittent le refroidisseur pour rejoindre la colonne d'oxydation-absorption, où ils se mélangent avec l'air secondaire avant de traverser de bas en haut la colonne à plateaux. La colonne est composée de trois sections :

- Le fond de la colonne qui compte deux parties ; la section de blanchiment et la zone de décantation de l'acide faible ;
- La section d'oxydation ;
- La section d'absorption.

ii. Absorption

L'eau nécessaire pour l'absorption des gaz et la formation de l'acide est fournie par une bêche à eau de procédé, elle est pompée par le sommet de la colonne. L'acide brut est dirigé vers la zone de blanchiment en bas de la colonne.

La teneur de NO_x décroît au fur et à mesure de leur montée dans la colonne, alors que la concentration en acide augmente au fur et à mesure de sa descente. L'absorption des gaz est favorisée à une basse température (environ 28 °C) et un ΔP (pression différentielle entre le haut et le bas de la colonne) élevée.

iii. Blanchiment

L'acide nitrique brut contient encore des gaz dissouts sous forme d' HNO_2 qui lui donne une couleur rouge jaunâtre. Les gaz nitreux sont éliminés en utilisant l'air secondaire et l'acide nitreux, ainsi est donc blanchi suivant la réaction :



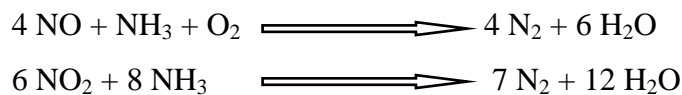
Depuis la zone de blanchiment, l'acide nitrique est envoyé vers les réservoirs de stockage par la pression du système.

f. Réduction des gaz de queue

Les gaz de queue quittent le sommet de la colonne d'absorption à une teneur en NOx d'environ 3300 ppm, une température de 40 °C et une pression comprise entre 6,1 et 6,5 bars. La réduction de ces gaz est faite grâce à un catalyseur à base d'un mélange de titane, de tungstène et d'oxyde de vanadium.

Avant d'entrer au réacteur de réduction, les gaz doivent être chauffés à 260 °C. Pour obtenir cette température, ces gaz appelés bruts sont chauffés dans un préchauffeur jusqu'à 115 °C, et ensuite dans un échangeur thermique jusqu'à 260 °C.

Une fois au réacteur, les gaz sont mélangés avec de l'ammoniac et acheminés à travers un mélangeur vers le lit des catalyseurs où des réactions exothermiques vont se dérouler comme suit :



Les gaz de queue quittent le réacteur à une température de 300 °C et passent par un échangeur thermique. Ce dernier va permettre la réduction de leur température à 230 °C. Les gaz purifiés sont ensuite acheminés vers la turbine de détente où leur pression sera réduite à 1 bar et leur température à 85 °C. Après détente, les gaz sont évacués vers l'atmosphère par la cheminée d'évacuation avec un taux de NO_x inférieur ou égale à 150 ppm.

2.2.3.3. Production de nitrate d'ammonium (ammonitrate)

Le nitrate d'ammonium (NH₄NO₃) est obtenu à partir de l'ammoniac et l'acide nitrique selon le procédé de production finlandais Stamicarbon. Le nitrate d'ammonium, aussi appelé solution nitrate ou ammonitrate, est obtenu lors de la production de fertilisant appelé calcium ammonium nitrate (CAN). La figure 24 ci-dessous présente les différentes étapes et intrants

dans le procédé de production du nitrate d'ammonium.

La production de CAN à Ferial-Annaba est faite au niveau de l'unité de production appelée CAN, notons que c'est le seul fertilisant fourni par l'entreprise et qui est fabriqué hors de l'unité de production des fertilisants appelée NPK.

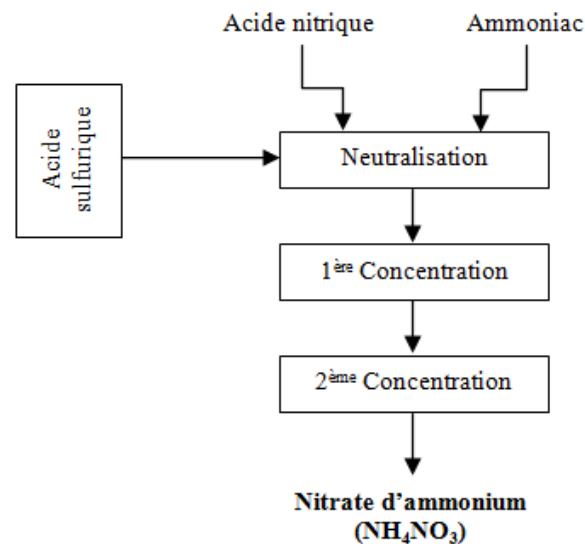


Fig. 24. Description du procédé de production de la solution nitrate

a. Section de stockage des matières premières

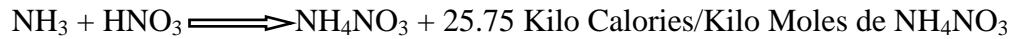
L'acide nitrique à 57% est stocké dans des bacs en Inox. L'ammoniac est stocké sous une pression de 3 à 4 bars, et une température qui ne dépasse pas 0 °C. L'alimentation des lignes de production dans l'unité par les matières premières est assurée par des pompes de refoulement selon les besoins de production.

Avant d'entrer au surchauffeur, l'ammoniac à l'état liquide, entre dans un évaporateur où il est évaporé avec l'aide de l'eau de refroidissement, sa température à la sortie de l'évaporation est de 17 °C et sa pression est de 6 bars. Une fois au surchauffeur, la température de l'ammoniac est élevée de 17 à 30 °C avec une pression de 4,5 bars.

b. Neutralisation du mélange (NH₃-HNO₃)

La neutralisation de l'acide nitrique à 57% massique auquel est additionné un peu d'acide sulfurique se fait par de l'ammoniac à l'état gazeux dans un réacteur en alliage

inoxydable selon la réaction chimique suivante :



Cette réaction est fortement exothermique, elle est effectuée à une température de 180 °C, et une pression de 4 bars. Le réacteur de neutralisation est équipé d'un séparateur de vapeur (vapeur de procédé). La vapeur récupérée au sommet du séparateur à 143°C est utilisée pour la première concentration. Au même temps, la solution nitrate à 77% passe par le bas du séparateur sous l'effet de la pression au ballon intermédiaire.

c. Premier effet de concentration (première évaporation)

La solution nitrate à 77% sort du séparateur et passe par un échangeur thermique. Ainsi chauffée, la solution passe en suite dans un séparateur opérant sous vide. La solution nitrate à 95% massique à 130 °C issue du premier effet de concentration est recueillie dans un bac de récupération.

d. Deuxième effet de concentration (deuxième évaporation)

La solution issue de la première concentration est envoyée vers la deuxième par une pompe de refoulement à 9,7 bars. Le deuxième effet de concentration est fait en deux étapes, l'évaporateur et le finisseur.

La solution passe dans les tubes d'un échangeur à contrecourant avec l'air chauffé à 190 °C, ce dernier est antérieurement chauffé par de la vapeur moyenne pression fournie par la centrale utilitaire II, dans le côté calandre de l'échangeur circule de la vapeur MP.

À la partie supérieure de cet échangeur sort l'air de séchage chargé d'humidité et d'une petite quantité de vésicules de nitrates et d'ammoniac qui sera lavé dans la section d'assainissement des gaz.

La solution de nitrate sort de la partie inférieure de l'échangeur à une concentration de 99,8%, elle sera une seconde fois soumise au séchage dans le finisseur dans lequel l'air circule à contrecourant, à la sortie de ce dernier, la solution déborde à une température de 180 °C dans un bac appelé bac de mélange.

2.2.3.4. Production de Calcium Ammonium Nitrate (CAN)

Le CAN est produit dans la même unité de production que la solution nitrate. Les différentes étapes de production de CAN sont montrées dans la figure 25 ci-dessous. Les lignes en bleu présentent le gaz destiné au lavage. Les lignes en vert présentent les opérations de recyclage des fines et des rebuts.

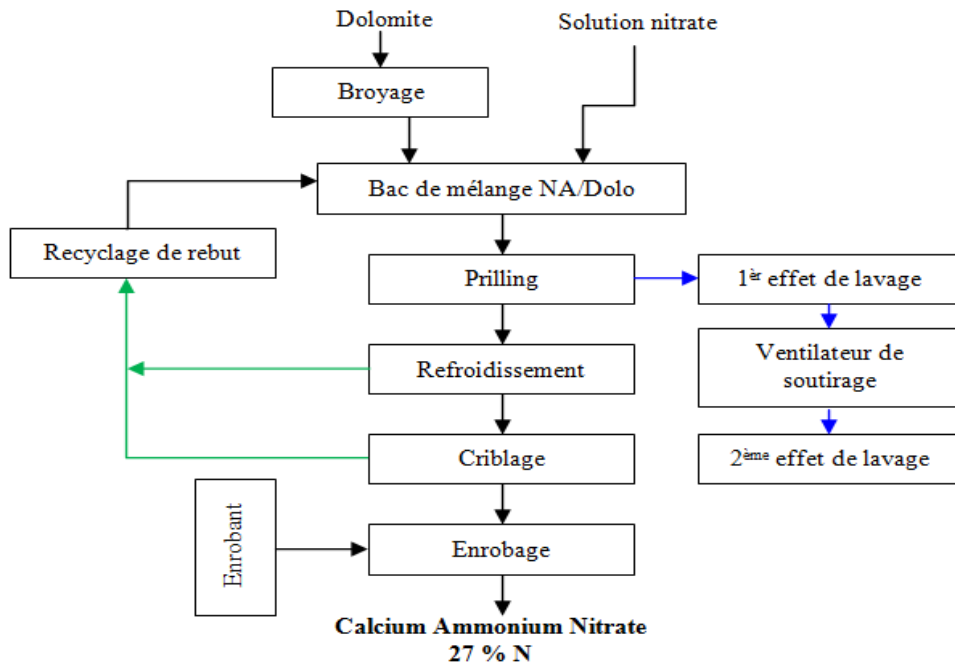


Fig. 25. Description du procédé de production de CAN à 27% N

a. Stockage et broyage de dolomite

Avant d'entrée dans l'unité, les gravillons de dolomites passent par une trémie d'alimentation, puis par un concasseur grâce à un élévateur avant que tous gravillons inférieurs à 15 mm seront stockés dans un silo. Une fois au silo, les gravillons sont versés dans le broyeur par un convoyeur à bande.

Après le broyage, la dolomite est fluidisée avec de l'air chaud à 75 °C. L'humidité résiduelle de la dolomite broyée ne doit pas dépasser 0,5%. Après avoir été séparée de l'air, la dolomite est déposée dans un silo de stockage de la dolomite broyée, avant qu'elle soit injectée dans le procédé selon les besoins de production. L'alimentation du procédé par la dolomite fluidisée se fait dans le bac de mélange situé en haut de la tour de prilling.

b. Mélange du produit

Le bac de mélange tire son appellation du fait que dans le cas de la production du CAN, la solution sera ballastée par de la dolomite finement broyée et dosée selon les spécifications requises pour le produit marchand. Le bac est muni d'un serpentin à vapeur MP et d'un agitateur central. Lors de la production de CAN, la solution de nitrate d'ammonium additionnée d'une quantité de dolomite est soutirée de sa partie inférieure et pulvérisée dans la tour de prilling grâce aux quatre buses de pulvérisation placées symétriquement sur la partie supérieure de la tour.

c. Prilling et refroidissement

D'une hauteur de 34 mètres, la solution issue du bac de mélange est pulvérisée à partir des buses. Lors de leurs chutes, les gouttes de CAN, sont refroidies et cristallisées. L'air ascendant aspiré par un ventilateur d'un débit de 789000 m³/h en haut de la tour, joue le rôle de support des frigories nécessaires au refroidissement du produit ainsi qu'il freine la chute libre des grains de CAN sur le plancher de fond de tour.

Le plancher de fond de tour est raclé en continu par un racleur qui déverse le produit ayant une température de 100 °C dans une goulotte d'alimentation du convoyeur à bande. Ce dernier déverse dans un émotteur qui casse les mottes et les gros grains souvent formés.

Le produit est ensuite transporté par convoyeur vers un refroidisseur sous forme d'un lit fluidisé, où il est refroidi jusqu'à 45 °C dans la première table, et à moins de 31 °C à la sortie de la deuxième.

Un air traité est injecté sous la plaque perforée de la deuxième table. Après un échange calorifique, l'air sera repris par un ventilateur intermédiaire, ce dernier va le faire passer vers un ventilateur, qui lui à son tour, injectera sous la première table. A la sortie de la table, l'air sera saturé par des particules fines de produit, ces fines seront aspirées et piégées par une batterie fonctionnant sous vide et ensuite réinjectées par une soufflante dans le procédé de production.

d. Classification et recyclage

En aval du refroidissement à lit fluidisé est installé un crible où la séparation des grains selon les spécifications en matière de granulométrie du produit fini est faite. Les gros de diamètre supérieur à 4mm ainsi que les fines de diamètre inférieur à 2mm, sont séparés du produit marchand. Avant d'être recyclés, les gros du rebut retenus par le tamis supérieur, passent par un broyeur qui à son tour déverse dans une petite trémie, le rebut est ensuite recyclé vers le bac de mélange.

e. Enrobage et expédition vers l'atelier de conditionnement

Le produit de granulométrie marchande issu du crible est enrobé d'une fine pellicule protectrice. La pellicule d'enrobant est dosée par deux pompes doseuses avec un rapport de 0.5% massique du produit fini.

f. Assainissement et lavage des gaz et poussières

L'air issu de la tour de prilling est aspiré par un ventilateur à travers un premier laveur pour être partiellement débarrassé des gaz et poussières qu'il entraîne. Au laveur, l'air est fortement mélangé à l'eau de dilution à une concentration de 20% de nitrate, une partie (environ 85%) de l'air refroidi et saturé des particules fines est partiellement traité dans le premier laveur, et ensuite recyclée dans le fond de la tour de prilling. Le reste de l'air (environ 15%), passe dans le deuxième laveur où il va subir un dernier lavage à l'eau pulvérisée. Le flux d'air ainsi lavé va s'échapper par la cheminée.

e. Filtration de l'eau de lavage

L'eau de lavage des gaz et poussières issue de la tour de prilling et du refroidisseur à lit fluidisé est filtrée et récupérée en continu par un système de récupération. Une partie de la solution circulante dans le laveur est envoyée dans un réservoir agité à partir duquel elle sera pompée pour alimenter un filtre à presse avec une humidité de 10%. Les particules à la sortie du filtre seront conduites vers le stock de dolomite, et l'eau sera réinjectée comme eau de lavage.

2.2.3.5. Production de Sulfazot (26%N + 36% SO₃)

L'unité NPK est conçue pour produire les fertilisants complexes dont la formule NPK

est la plus connue, le nom NPK est attribué à cette unité pour cette raison. Les nutriments majeurs : azote (N), phosphore (P_2O_5) et potassium (K_2O) sont mélangés dans certaines quantités selon les besoins des cultures. Outre les formules complexes, l'unité assure aussi la production des formules en binaire : NP, PK ou NK, et aussi les formules simples telles que le SSP, le TSP ou le Sulfazot, ce dernier est un fertilisant produit à base d'azote.

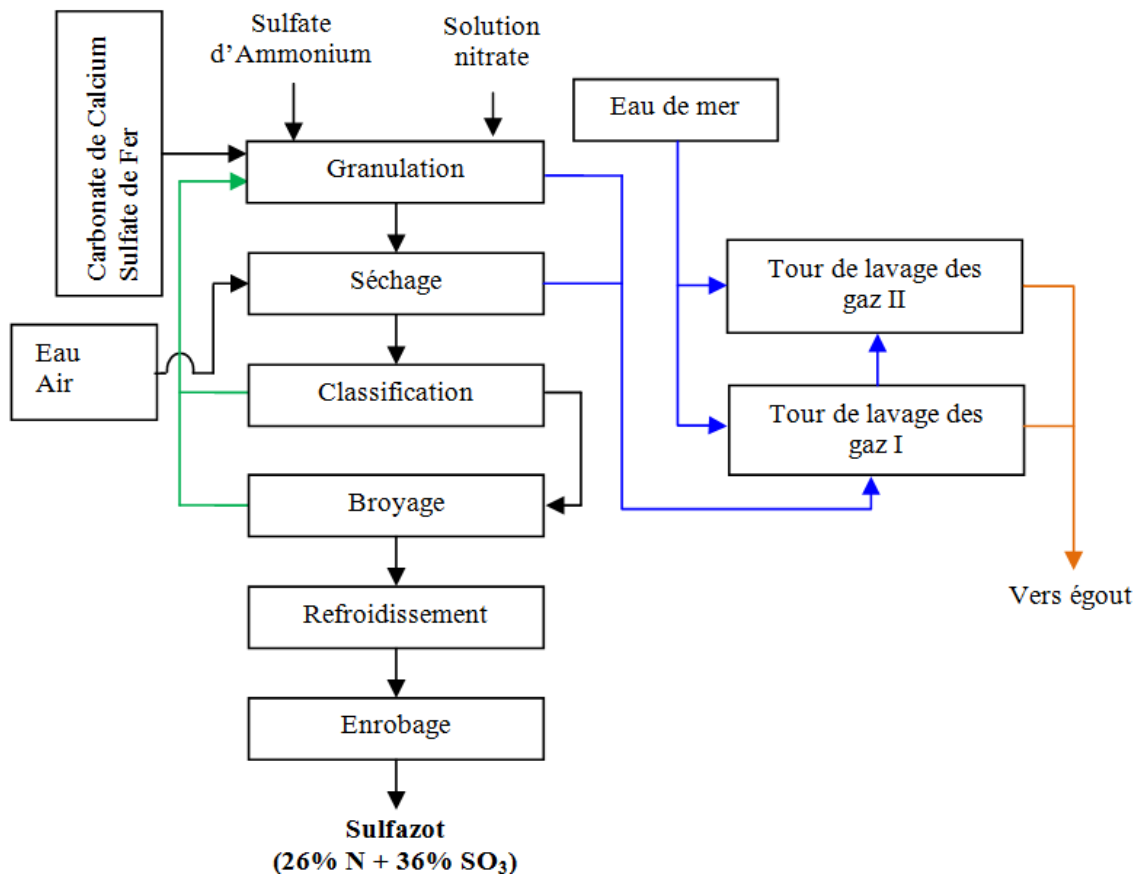


Fig. 26. Description du procédé de production du Sulfazot

Dans la figure 26 ci-dessus sont montrées les différentes opérations de production ainsi que les intrants dans le procédé de production de Sulfazot. Les lignes en verts présentent le produit hors classe granulométrique demandée et qui est recyclé en granulation. Les lignes en bleu présentent le système de lavage des gaz de procédé traités grâce à l'eau de mer. Les eaux utilisées dans le lavage des gaz sont représentées par les lignes marron.

a. Granulation

Le sulfate d'ammonium est utilisé sous forme solide (poudre) comme source d'azote, il est mis dans le granulateur avec la solution nitrate, du carbonate de calcium et du sulfate de

fer en petite quantité sont ajoutés au mélange utilisé ; le rôle du carbonate de calcium est de régler le Ph du produit à la sortie du granulateur ; le sulfate de fer est utilisé pour favoriser la granulation et augmenter la dureté du produit fini.

La solution bouillante commence au fur et à mesure de la rotation du granulateur à perdre de l'humidité, et les grains commencent à se former. À cause de l'inclinaison de l'axe de rotation du tambour granulateur, les granulés ainsi formés tombent du granulateur vers le couloir de séchage. Les gaz évacués du granulateur sont récupérés et acheminés vers les tours de lavage des gaz.

b. Séchage

Les granulés entrent dans un séchoir cylindrique de 36m de longueur et 5m de diamètre. L'humidité du produit à l'entrée du séchoir est de 3%, à la sortie, elle ne doit pas dépasser 1%. Le séchage se fait grâce à l'air chaud qui traverse le tube dans le même sens que le produit, des pelles mécaniques sont utilisées pour assurer un bon séchage homogène de tous les granulés.

La chaleur utilisée est due à la combustion de gaz naturel dans la chambre de combustion qui se trouve dans la chauffe. La température d'entrée de l'air de séchage est limitée entre 250 et 300 °C, la température des granulés à la sortie du séchoir est de 80 °C pour éviter la décomposition du nitrate.

c. Classification

Le produit granulé sortant du sécheur est d'une granulométrie variable, il est récupéré directement par un élévateur à godet et acheminé vers le scalper. Le produit passe par des tamis vibrant, permettant de séparer la tranche granulométrique supérieure et inférieure à la valeur choisie. Le tamis vibrant est composé de deux éléments superposés qui travaillent en série. Les mailles du crible supérieur ont un diamètre de 4 mm, ceux du crible inférieur sont de 2 mm :

- Les grains supérieurs à 4 mm passent par le broyeur et retournent au broyeur puis le granulateur pour le recyclage.

- Les grains inférieurs à 2mm sont dirigés vers le granulateur pour le recyclage.
- Les grains qui ne passent pas par les fines mailles du crible inférieur, les grains appartenant à la classe granulométrique comprise entre 2 et 4 mm, sont le produit fini, ils sont dirigés directement vers le refroidissement.

d. Refroidissement

Après classification, le produit fini sort à 80 °C et passe dans un fluidiseur alimenté en air à l'aide de trois ventilateurs afin de baisser la température pour éviter la prise en masse du produit fini pendant le stockage.

e. Lavage des gaz

Les gaz venant du séchoir sont d'abord dépoussiérés dans une batterie de cyclonage, les poussières récupérées des cyclones sont lavées par de l'eau de mer dans les tours primaire et secondaire avant d'être rejetées vers l'atmosphère.

2.3. Bilan quantitatif et qualitatif des entrées

2.3.1. Bilan d'entrée pour la phase d'extraction du gaz naturel

La capacité nominale de production du champ de Hassi R'mel est de 150 million Sm³/j.

2.3.1.1. Bilan d'entrée de l'unité SRGA

La station SRGA est conçue pour réduire le torchage et récupérer efficacement les gaz séparés dans les stations d'huile avec une capacité nominale de 4 millions Sm³/jour. Le tableau 12 ci-dessous présente le bilan quantitatif de l'unité SRGA.

Tableau 12. Bilan d'entrée de l'unité SRGA

Bilan d'entrée Station de Récupération des Gaz Associés (SRGA)			
Produits consommés		Unité	Quantité par Sm ³
Gaz associé	Matière première	Sm ³	-
	Eaux potables et sanitaires	m ³	2x10 ⁻⁶
Eau	Eau industrielle		0,525x10 ⁻³
Fuel gaz	Combustible pour les turbines.	Sm ³	0,06
	Flamme pilote de la torche		0,081x10 ⁻³

Électricité	Équipements électriques	MJ	130,32x10 ⁻⁶
Huiles et lubrifiants	TORBA (ISO VG 46)	L	23x10 ⁻⁶

2.3.1.2. Bilan d'entrée de l'unité SBC

L'unité SBC est d'une capacité totale de 150 millions Sm³/j assurées par un séparateur d'admission et 5 trains de compression, dont 3 fonctionnant en continu et 2 en stand-by. Le tableau 13 montre le bilan quantitatif d'entrée de l'unité.

Tableau 13. Bilan d'entrée de l'unité SBC

Bilan d'entrée Station Boosting Centre (SBC).			
Fuel gaz	Combustible (turbines)	m ³	30,46x10 ⁻⁴
	Flamme pilote de la torche		15,424x10 ⁻⁶
Électricité	Équipements électriques	MJ	6,133x10 ⁻⁹
Produits chimiques	(Chimec 1038)	L	5x10 ⁻⁷
Huiles et lubrifiant	TORBA (ISO VG 46)	L	-

2.3.1.3. Bilan d'entrée de l'unité MPP-0

Le MPP-0 est constitué de deux trains de traitement d'une capacité de 15 millions de Sm³/j pour chacun. Le tableau 14 ci-dessous donne le bilan d'entrée de l'unité.

Tableau 14. Bilan d'entrée de l'unité MPP-0

Bilan d'entrée module process plant (MPP-0)			
Eau	Eau potable	m ³	34,33x10 ⁻⁶
Fuel gaz	Combustible	Nm ³	34,04x10 ⁻⁴
	Flamme pilote de la torche		162,4x10 ⁻⁶
Électricité	Équipements électriques	MJ	24,333x10 ⁻⁶
Produits chimiques	Glycol (DEG)	L	25x10 ⁻⁹

2.3.2. Bilan d'entrée pour la phase de transport du gaz naturel

Le gaz naturel doit être comprimé sous haute pression avant d'être transporté par gazoduc, ces derniers sont enterrés sous terre ou bien immergés. Les gazoducs sont constitués par des tubes en acier avec une épaisseur de quelques mm, et un diamètre de 0,9 à 1,4 m. Dans le gazoduc, le gaz naturel circule avec une vitesse moyenne de 30 km/h sous l'effet de la différence de pression existant entre le point de départ (le gisement ou l'usine de traitement) et l'arrivée (les points de consommation). Pour maintenir la pression (environ 70 bars) stable dans le gazoduc, des stations de compression sont installées tous les 80 à 120 km (Tableau

15).

Tableau 15. Bilan d'entrée pour le sous-système : transport de gaz naturel

Moyen de transport	Entrée	Unité	Quantité par 1 Nm ³
Gazoduc (compresseur)	Demande d'énergie	Nm ³ /t.km	0,269 x10 ⁻³

2.3.3. Bilan d'entrée pour la phase de production des fertilisants

Le gaz naturel arrivant des champs de Hassi R'mel est la principale matière première du complexe d'Annaba (449,94x10⁶ Nm³ de gaz naturel consommé l'année 2010 dont 363,33x10⁶ Nm³ pour l'unité NH₃). Les principaux entrants dans les procédés de l'entreprise sont donnés dans le tableau 16 ci-dessous :

Tableau 16. Bilan annuel des entrées aux principales unités de production de Fertial-Annaba

Description	Gaz (Nm ³)	Électricité (MJ)	Vapeur (T)	Eau déminéralisée (m ³)
Ammoniac	354,211x10 ⁶	45,057x10 ⁶	206,366x10 ³	229,747x10 ³
Acide nitrique	-	53,912x10 ⁶	28,821x10 ³	100,262x10 ³
Vapeur HP	92,994x10 ⁶	28,612x10 ⁶	-	527,915x10 ³
Eau dessalée	-	31.435x10 ⁶	457,788x10 ³	-
Eau déminéralisée	-	-	47,002x10 ³	-
Unité NPK	273,275x10 ⁶	40,978x10 ⁶	-	-
Total	449,946x10 ⁶	199,994x10 ⁶	739,977x10 ³	657,747x10 ³

2.3.3.1. Bilan d'entrée de l'unité de production de l'ammoniac

La production de l'unité Ammoniac relative à l'année 2010 est de 258 138 tonnes. Le tableau 17 ci-dessous montre l'inventaire d'entrée détaillé de l'unité de production d'ammoniac.

Tableau 17. Bilan d'entrée pour l'unité ammoniac

Produits consommés	Unité	Quantité par tonne
Gaz naturel	Nm ³	Gaz procès
		Gaz combustible
Vapeur haute pression	T	0,799
Eau	m ³	0,946
Électricité	MJ	174,55
Huiles et lubrifiants	L	0,119

2.3.3.2. Bilan d'entrée de l'unité de production de l'acide nitrique

La production annuelle d'acide nitrique dans le complexe est de 44 852 T. La consommation annuelle de la vapeur HP dans l'unité d'acide nitrique est de 69 885 T, dont 13273 T sont importées de la Centrale Utilitaire II, le reste est généré lors de la conversion de l'ammoniac dans le réacteur de conversion, cette quantité localement produite est toujours utilisée en circuit fermé. L'inventaire détaillé de l'unité est montré dans le tableau 18.

Tableau 18. Bilan d'entrée pour l'unité acide nitrique

Produits consommés		Unité	Quantité par tonne
Ammoniac		m ³	0,328
Vapeur	Haute pression	T	1,558
	Basse pression		0,385
Eau	Eau douce	m ³	0,338
	Eau déminéralisée		0,447
Électricité		MJ	1 202,4
Huiles et lubrifiants	TORBA 46	L	0,031

2.3.3.3. Bilan d'entrée de l'unité de production CAN

La production annuelle de l'unité CAN 27% est de 20 783 T. La quantité produite de la solution nitrate est de 56 162 T dont la grande partie entre dans la production du CAN. Le tableau 19 ci-dessous montre les données détaillées de l'inventaire des entrées de l'unité.

Tableau 19. Bilan d'entrée pour l'unité nitrate d'ammonium

Produits consommés		Unité	Quantité par tonne
Solution nitrate (NH ₄ NO ₃)	Ammoniac	T	0,271
	Acide nitrique		0,825
	Eau	m ³	0,065
CAN 27%	Solution nitrate	T	0,871
	Dolomite	T	0,208
	Électricité	MJ	6,84
	Vapeur BP	T	0,1

2.3.3.4. Bilan d'entrée de l'unité de production des fertilisants : fonction Sulfazot

La production annuelle de l'unité NPK en Sulfazot est de 12 700 T. Le tableau 20 ci-dessous présente le bilan quantitatif détaillé lié à la production d'une tonne de Sulfazot.

Tableau 20. Bilan d'entrée de l'unité de production des fertilisants : fonction de Sulfazot

Produits consommés	Unité	Quantité par tonne
Sulfate d'ammonium		0,572
Nitrate d'ammonium	T	0,579
Sulfate de fer		0,043
Carbonate de calcium		0,035
Eau	m ³	3,736
Gaz naturel	Nm ³	26,36
Électricité	MJ	0,447

CHAPITRE 4

ANALYSE DE CYCLE DE VIE DES FERTILISANTS PHOSPHATÉS

1. Objectif et champ d'étude

1.1. Objectif de l'étude

Dans ce chapitre, une évaluation de cycle de vie des fertilisants produits à base de phosphate et d'autres mixtes sera réalisée, dont la quantification des intrants au procédé de production et l'évaluation des impacts environnementaux liés au cycle de vie de ces fertilisants sera l'objectif principal.

La principale matière première utilisée dans la production des fertilisants phosphatés est le phosphate moulu extrait des mines à ciel ouvert de phosphate de Tébessa à l'extrême Est de l'Algérie.

Dans ce chapitre, nous avons comme objectif, l'évaluation de l'impact généré par la production de deux fertilisants phosphatés, le triple superphosphate (TSP) et le super simple phosphate (SSP), et de deux autres fertilisants mixtes, le NPK 3x15 à base de sulfate et le NPK 3x15 à base de chlore.

Les objectifs de l'étude peuvent être résumés comme suit :

- Établir un inventaire détaillé des entrées et des sorties ;
- Identification des flux élémentaires échangés par le système étudié avec l'environnement ;
- Évaluation des impacts et des aspects environnementaux liés à chaque phase de vie des produits ;
- Recherche des meilleures solutions à proposer pour éliminer ou minimiser ces impacts.

1.2. Champ d'étude et frontière de système

Le système objet de l'étude s'étend sur deux différents sites séparés de plus de 800 km (extraction et traitement du phosphate brut dans le premier et production des fertilisants dans le second), cela impose le transport routier du minerai de phosphate par camion ou par train.

L'étude est menée depuis l'extraction du phosphate brut jusqu'à la mise en vente des fertilisants "du berceau à la porte" qui prend en considération les deux premières phases de vie du produit (l'extraction de la matière première et son transport, et la production des fertilisants).

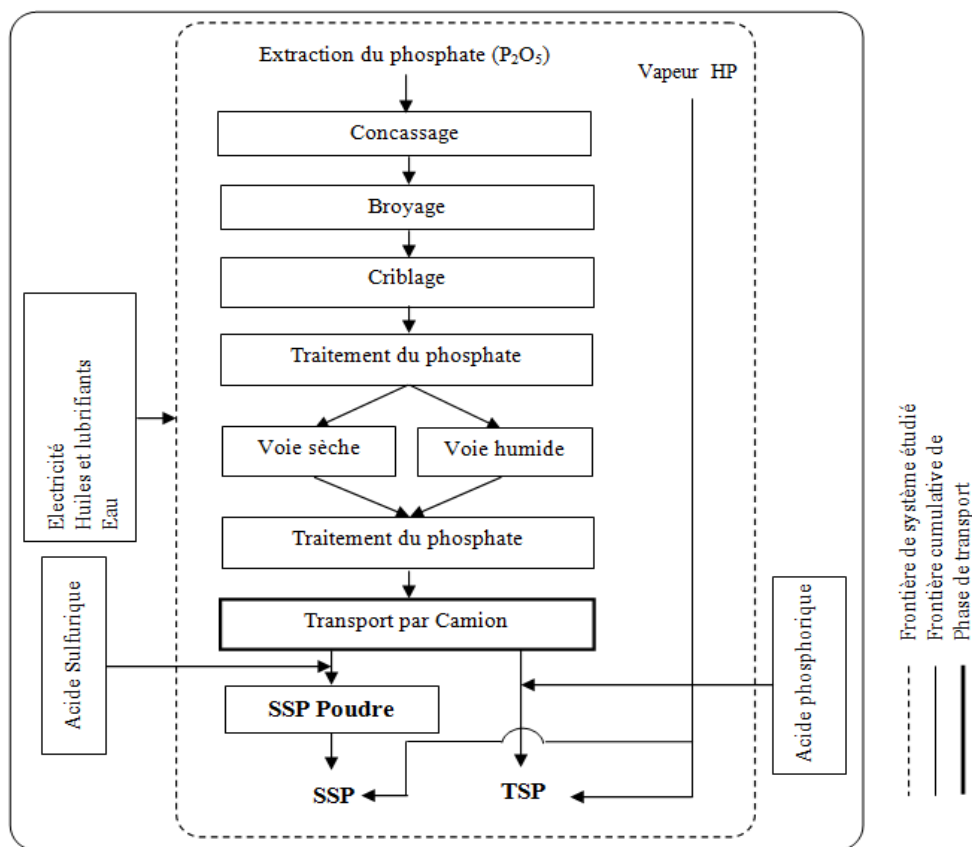


Fig. 27. Frontière du système de production des fertilisants phosphatés (TSP & SSP)

La première phase de vie prise en considération est la phase d'extraction de la matière première ; dans cette phase, l'extraction, le concassage, le broyage, et le criblage du phosphate brut, puis le traitement de ce dernier sont analysés. Après le traitement, la phase de transport est présentée par le transport du phosphate traité par route dans des camions ou par wagons par ferrée. La phase de production des fertilisants est la dernière phase, elle s'étend de

l'entrée du phosphate à l'usine, puis son moulage, et jusqu'à la production du TSP et du SSP. Dans ce chapitre, en plus des fertilisants phosphatés, les deux produits mixtes, NPK 3x15 à base de sulfate et à base de chlore, sont pris en compte.

Une présentation graphique sous forme d'arbre de synthèse des processus du système étudié est faite pour expliquer les différentes étapes de cycle de vie et donner un aperçu des entrées et sorties dans le système. La figure 27 ci-dessus présente les différents processus unitaires de chacun des fertilisants phosphatés TSP et SSP. La figure 28 ci-dessous, présente les différents processus unitaires de chacun des fertilisants NPK.

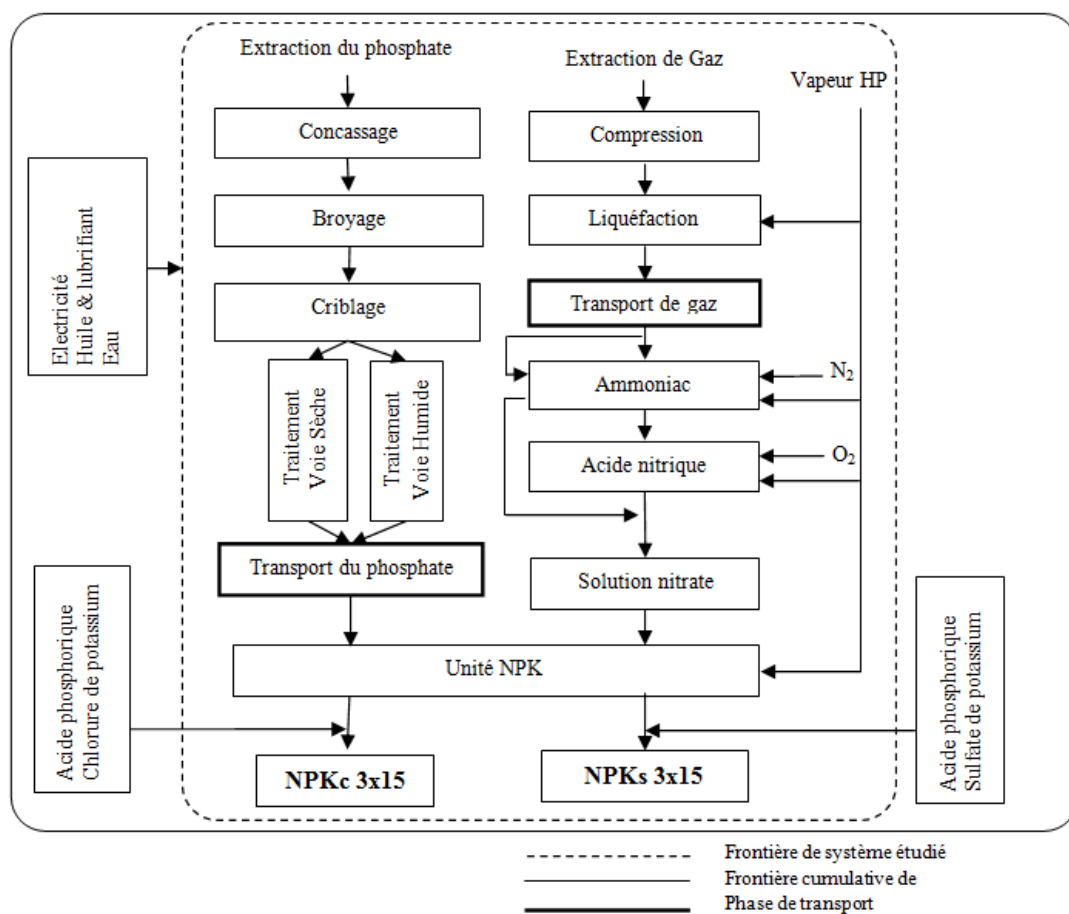


Fig. 28. Frontière du système de production des fertilisants composés (NPKs 3x15 et NPKch 3x15)

Pour prendre en compte les matériaux et l'énergie ainsi que les impacts sur l'environnement, deux limites du système ont été définies pour cette analyse. La frontière cumulative de système (cadre avec ligne discontinue) présente les matériaux, la consommation d'énergie et les émissions associées de tous les processus. La deuxième

frontière (cadre avec ligne continue) est la limite du système étudié. Cette seconde frontière présente les processus pour lesquels des données primaires ont été recueillies directement auprès des unités de production. La phase de transport (cadre avec ligne grasse) sépare les opérations menées dans les sites de production.

1.3. L'unité fonctionnelle

Pour cette partie de l'étude, une tonne de fertilisant produit à partir du phosphate brut et issue de différentes phases de production a été choisie comme unité de référence ou unité fonctionnelle. Pour les deux fertilisants composés NPK 3x15, la même unité fonctionnelle a été choisie.

Le choix d'une tonne comme unité de référence revient à la simplicité qu'elle va porter lors du calcul et la réalisation de l'inventaire des entrées.

2. Analyse de l'inventaire

2.1. Qualité des données

Pour les données de production relatives à l'extraction des matières premières (extraction de phosphate), nous avons utilisé des données primaires collectées directement des sites de production de l'entreprise SomiPhos-Tébessa ; ces données correspondent à l'année 2010. Dans l'usine de Tébessa, deux procédés de production sont utilisés (voie sèche & voie humide) ; dans l'inventaire des entrées, les données relatives à la voie sèche sont utilisées, car c'est la voie qui présente le plus d'impact sur l'environnement et cela est dû à la forte consommation d'énergie non renouvelable.

Le phosphate traité à l'usine de Tébessa est transporté par voie ferrée ou par route. Lors de la modélisation informatique, on a proposé deux scénarios de transport, le premier par train et le deuxième par camion. Le choix du scénario de camion revient à ce que ce dernier présente plus d'impact sur l'environnement.

Les données de la phase de transport des matières premières (transport du phosphate par camion) sont des données primaires collectées auprès de l'entreprise de transport Sotramine du groupe FerPhos. Les données d'entrée pour les matières utilisées dans la

production des fertilisants (acide phosphorique et acide sulfurique) sont secondaires et extraites de la base de données de GEMIS.

2.2. Description du système de production des fertilisants phosphatés

2.2.1. Phase d'extraction de phosphate

La zone de Bir El-Ater est réputée pour la richesse de son substrat géologique que ce soit en matière de minerais ou en substances pour les matériaux de construction. En effet, grâce à son gisement de phosphate estimé à environ un milliard de tonnes, il constitue l'un des principaux pôles miniers du pays.

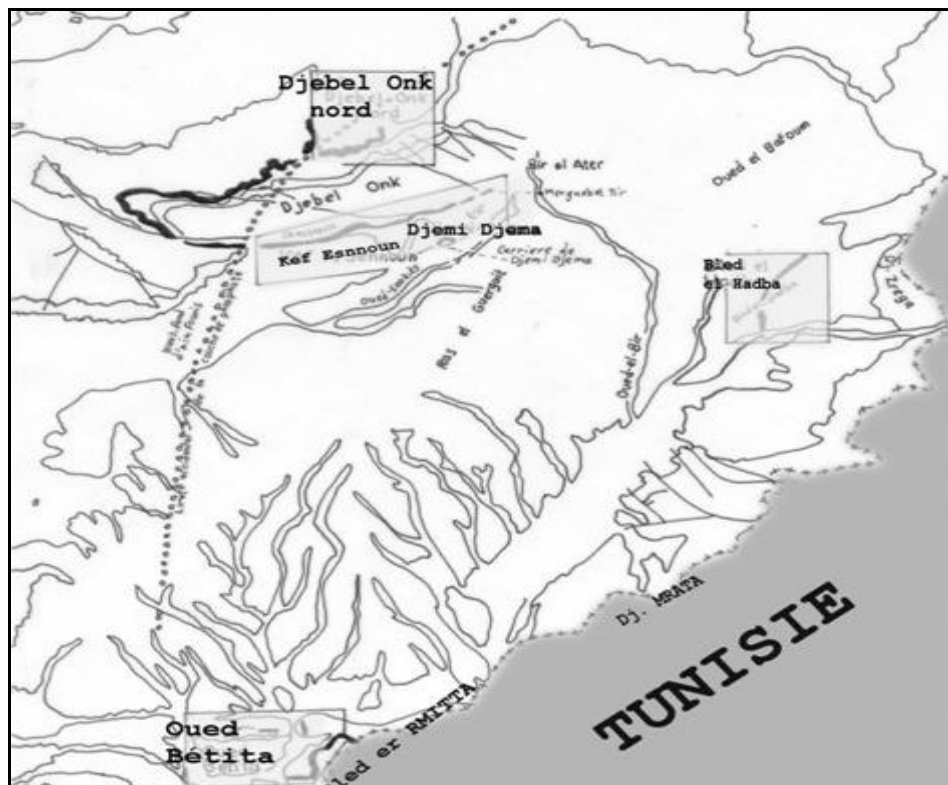


Fig. 29. Carte de situation géographique et géologique des gisements de Djebel Onk (Prian et Cortial, 1993).

La région de Djebel Onk est située à 80 km au sud-ouest de Tébessa sur la route qui relie Tébessa à El-Oued et à 20 km de la frontière Algéro-Tunisienne. Elle constitue la limite géographique naturelle entre les hauts plateaux constantinois et le domaine saharien. Djebel Onk est lui-même un massif montagneux calcaire long d'une vingtaine de km et il culmine à

1198 m au Djebel Tarfaya (EHS, 2009). La figure 29 ci-dessus montre l'emplacement des différents gisements de phosphate à Tébessa.

La région de Djebel Onk est composée de 5 secteurs miniers :

- Gisement de Djemidjema,
- Gisement de Kef Esnnoun,
- Gisement de Djebel Onk nord,
- Gisement d'Oued Betita,
- Gisement de Bled El Hadba

Le gisement de Kef Esnnoun est situé à 2 km à l'ouest du gisement de Djemi Djema. Il constitue le gîte principal le plus prometteur qui devrait permettre à « SomiPhos » d'atteindre les objectifs de développement fixés. Sa superficie, circonscrite par les sondages de reconnaissances est d'environ de 2.1 km² soit 2,7 km de longueur et 0.8 km de largeur.

Pour faciliter l'identification des opérations accomplies par le système et les impacts causés par chaque opération, le système a été découpé en 3 sous-systèmes : - extraction de phosphate, - transport par camion - production des fertilisants. Le sous-système extraction de phosphate comprend plusieurs opérations unitaires, ces opérations sont regroupées dans des fonctions comme montré ci-dessous dans le tableau 21 :

Tableau 21. Présentation du sous-système : extraction de phosphate

Opérations unitaires étudiées	Fonctions accomplies
Terrassement ; forage ; tir ; chargement ; transport.	1. Extraction
Concassage ; broyage ; criblage.	2. Préparation
Séchage ; broyage ; criblage ; classification.	Voie sèche
Débourbage ; calcination ; lavage ; séchage.	Voie humide
	3. Traitement

2.2.1.1. Extraction du phosphate brut

La nature du gisement est le principal facteur déterminant les paramètres et les méthodes d'exploitation utilisés. Compte tenu des conditions géominières de gîte (pendage et affleurement), l'exploitation du gisement de Kef Esnnoun reste toujours exploitable avec un seul bord.

a. Découverte du gisement

Vu l'emplacement du gisement qui se trouve à plusieurs mètres sous terre, les opérations de découvertures sont nécessaires pour mettre à jour le gisement et permettre son exploitation. La découverte est réalisée par le chargement et le transport du stérile vers les terrils soit par les moyens du complexe minier soit par la sous-traitance (dans la mine de Kef Esnnoun, les opérations de décapage ont été confiées au prestataire AKGOGK).

b. Forage et tire

La préparation des roches à l'excavation consiste à détruire le massif des roches jusqu'à l'obtention des morceaux de dimensions nécessaires et admissibles pour le travail efficace de tous les engins d'extraction, de chargement, de transport et de traitement.

Le forage dans la mine de Kef Esnnoun est assuré par des sondeuses et des chariots de forage avec un rendement horaire qui varie entre 40-50 m/h pour les sondeuses et 20-25m/h pour les chariots.

La matière explosive principale utilisée pour l'abattage du minerai de phosphate dans la mine est l'Anfomil. Produit à base de nitrate d'ammonium, de fuel et d'aluminium. Cette substance est utilisée pour son bas coup ainsi que pour sa bonne sécurité de manipulation. Son inconvénient est sa faible résistance à l'eau.

c. Chargement et transport

Après le tir, le minerai et les roches stériles sont chargés dans les moyens de transport (camions de type Hitachi ou Caterpillar avec une capacité de chargement qui varie entre 35 et 50T). Le chargement de la masse abattue se fait par les excavateurs ou les chargeuses.

2.2.1.2. Préparation du phosphate brut

Le minerai tout-venant de la mine arrive à des diamètres inférieurs ou égaux à 1200 mm. Avant d'être conduit au traitement, le minerai doit passer par la préparation mécanique. Le déroulement des différentes opérations pour la préparation mécanique du phosphate est indiqué dans la figure 30.

a. Concassage

Cette opération consiste à réduire les blocs de 1 m arrivant de la carrière à une granulométrie inférieure à 200 mm de diamètre, au moyen d'un concasseur giratoire de capacité 1000 à 1200 t/h.

b. Broyage

Cette opération a pour but la réduction des blocs de minerai venant du concasseur à une granulométrie inférieure à un diamètre de 20 mm. Cette opération se fait au moyen de 3 broyeurs à marteaux d'une capacité de 250 t/h chacun. Les trois broyeurs situés sur les trois lignes sont alimentés par un répartiteur.

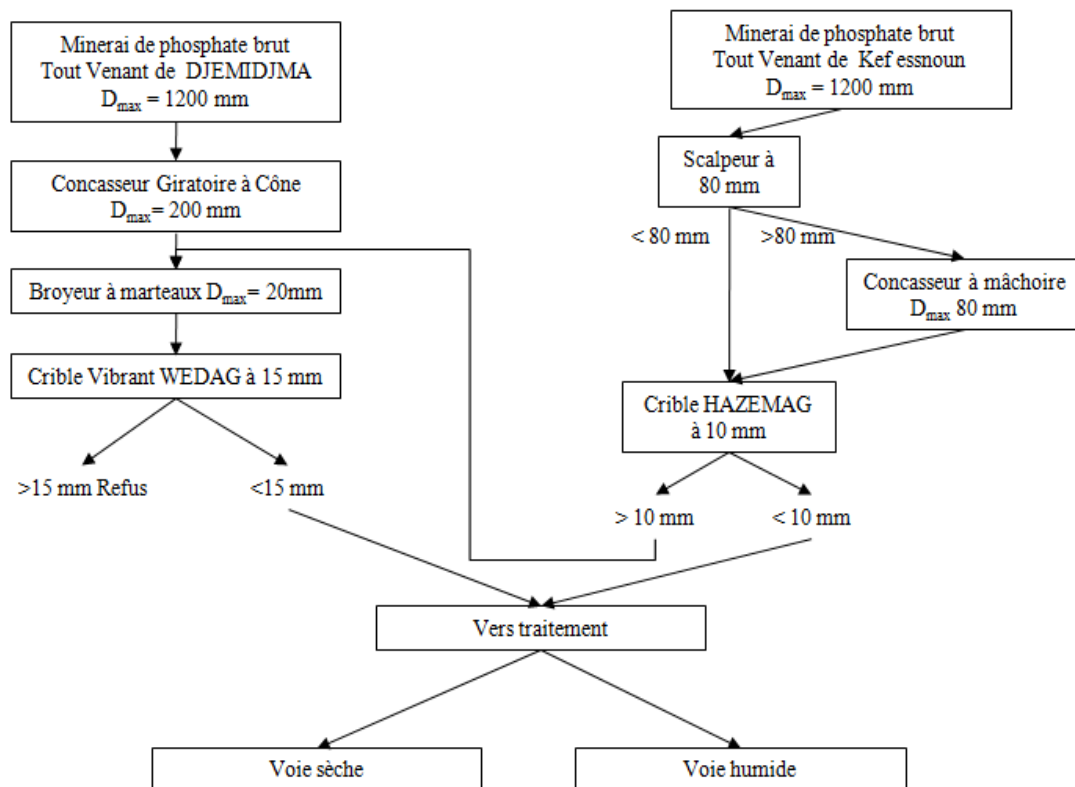


Fig. 30. Description du procédé de préparation mécanique du phosphate

c. Criblage

L'opération de criblage est utilisée pour opérer une sélection inférieure à 15 mm et est suivie de l'expédition vers les deux chaînes de traitement :

- (DKI) : débouillage - lavage
- (DKII, DKIII) : dépoussiérage.

Le refus de criblage de dimension supérieure à 15 mm et qui contient près de 20% de P_2O_5 est expédié par convoyeur à bandes vers une trémie pour être repris par des camions et évacué vers les stériles. L'atelier criblage est constitué de 3 cribles WEDAG de 250t/h chacun.

2.2.1.3. Traitement du phosphate

Dans l'usine de traitement, il existe 2 voies de production : voie humide et voie sèche.

a. Procédé par voie humide (DK I)

Cette opération s'effectue dans les ateliers de débouillage, de lavage et séchage (DKI). Elle permet d'enrichir le minerai à une teneur de (69% à 77%) et (73% à 79%) TPL. La figure 31 ci-dessous montre les différentes étapes de traitement dans la voie humide.

i. Débouillage

L'unité est équipée de trois lignes de production similaire d'une capacité de 90 t/h chacune. Le débouillage consiste à la mise en pulpe du produit criblé dans une proportion liquide/solide de 60 %, pour ensuite alimenter le criblage en humide afin d'éliminer les matières siliceuses et argileuses supérieures à 1mm au moyen de trois grilles courbes (grille courbe, grille courbe secondaire et grille courbe de contrôle), placées en série qui permettent de récupérer les grains inférieurs à 1 mm cimenté aux refus.

Le refus de la grille de contrôle sera acheminé vers une trémie de déchargement. Tandis que le passant alimente une batterie d'hydro-cyclone dont le but est d'éliminer les fines particules inférieures à 80 μm , en sur verses (appelé coupure basse), cette eau boueuse (Shlamms) passe vers l'épaississeur, ce dernier a pour but la régénération d'eau industrielle qui sera injectée dans le circuit de mise en pulpe. Les sous verses seront acheminés vers un filtre à bande pour réduire l'humidité du produit jusqu'à 13 %.

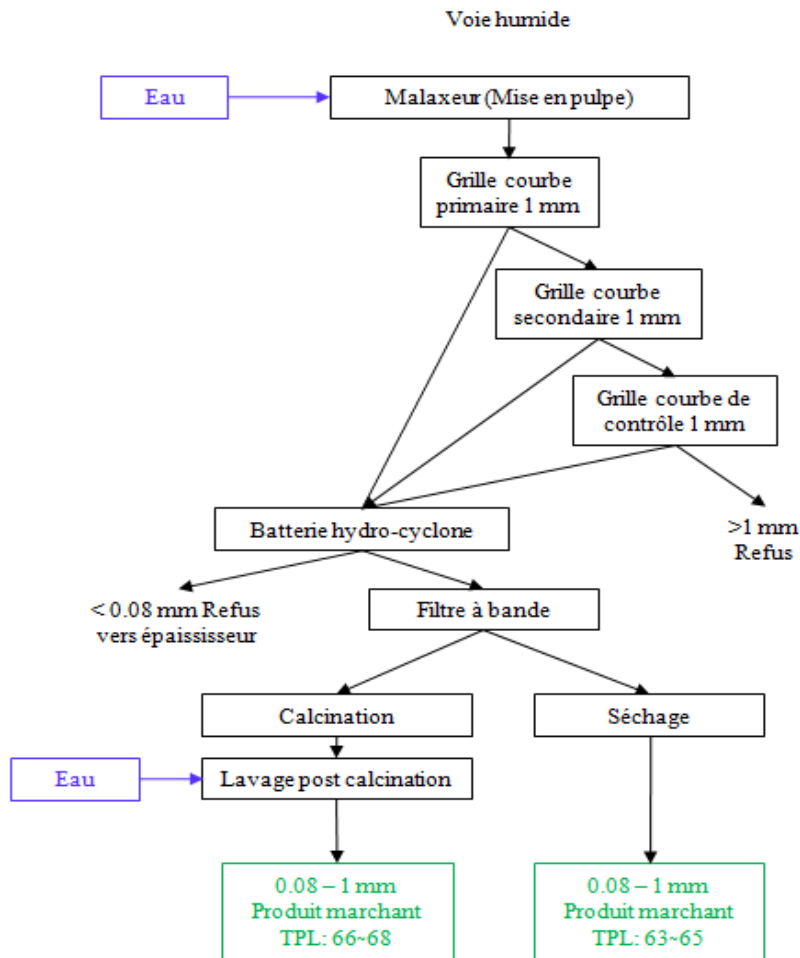


Fig. 31. Description du procédé de traitement du phosphate par voie humide

ii. Séchage

Le produit débourbé étant un produit semi-fini, préalablement destiné à un traitement pyrotechnique par calcination à des températures allant de 700° jusqu'à 900 °C pour produire une gamme de qualités allant de 69 à 75 % TPL.

Le deuxième atelier de séchage est équipé de deux fours horizontaux rotatifs dont la température ajustée est à 105°C ± 5°C, après séchage, l'humidité est réduite à 1 %.

iii. Calcination

Le rôle de la calcination est la décomposition des carbonates, l'élimination de la matière organique et des matières volatiles se trouvant dans le phosphate débourbé par le procédé thermochimique.

Le taux de CO₂ à l'arrivée est de 7 à 8 %, il sera réduit à 2 - 4 % par calcination selon la température. La teneur en P₂O₅ peut atteindre 33,5 %, en partant d'une alimentation qui titre 28 à 29 % de P₂O₅.

iv. Lavage post calcination

Le lavage post calcination permet l'élimination des oxydes issus de l'atelier de calcination. Cette opération s'opère dans des bacs pulsés et des coupures basses par des hydrocyclones.

b. Procédé par voie sèche (DK II & DK III)

Le produit arrive à l'atelier avec une granulométrie inférieure à 15mm et une humidité de 7%, dans l'atelier de traitement à voie sèche, il est séché presque entièrement, ce qui permet une désagrégation favorable. La figure 32 ci-dessous explique les différentes étapes de traitement dans l'unité à voie sèche.

i. Séchage

Le produit criblé, pénètre par le haut du four sécheur à lit fluidisé maintenu à une température de 105°C, pour subir deux opérations instantanées à la fois, la déshydratation qui vise à éliminer toute trace d'eau dans le produit, et l'attrition qui libère les fines particules par le frottement des grains de phosphates entre eux.

L'entraînement et la suspension de ces grains, suivant leur finesse, sont causés par un mélange de courant d'air ascendant qui est constitué d'air de combustion pour maintenir instantanément le lit de phosphate en fluidisation et à hauteur constante.

A cet effet, les fines particules issues de la fluidisation sont récupérées dans une batterie de cyclones primaires dont le rôle est de récupérer les grains de phosphates échappés avec les fines. Ensuite, ces fines particules passeront vers une deuxième batterie de cyclones secondaires qui serviront d'un côté à recueillir les fines inférieures à 80 µm pour les évacuer ensuite vers la trémie des refus, et d'un autre côté à dégager les particules ultras fines (inférieures à 40 µm) vers l'atmosphère.

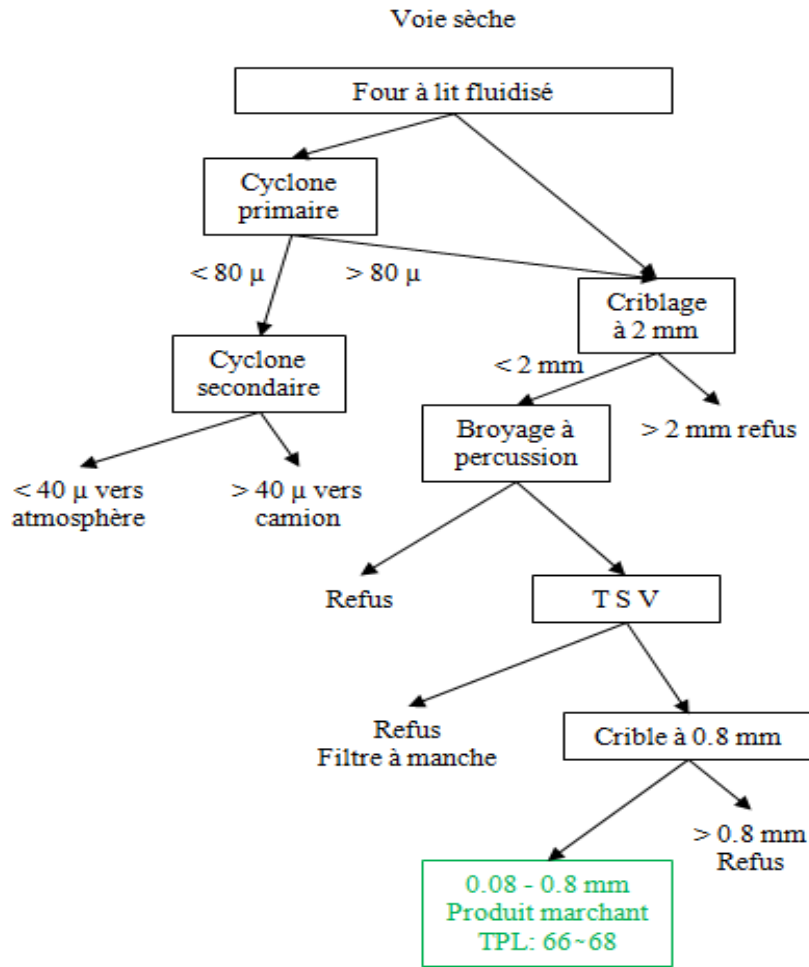


Fig. 32. Description du procédé de traitement du phosphate par voie sèche

ii. Criblage à 2mm

Le produit séché est reconduit par un convoyeur à bande vers l'atelier de criblage pour être tamisé au moyen de quatre cribles vibrants à résonance avec une maille de 2mm et d'un débit horaire de 120 t/h chacun. Le passant de ces cribles sera acheminé vers l'atelier de broyage, cependant les refus sont transportés vers la trémie des refus.

iii. Broyage à percussion

Le broyage vise à libérer les fines particules qui enveloppent les grains de phosphate au moyen de trois broyeurs à percussion d'un débit horaire de 100 t/h entraînant ainsi une attrition (frottement des particules entre elles).

Les fines dégagées de ces broyeurs seront collectées à travers une tuyauterie

d'aspiration d'air poussiéreux qui finira par des cyclones et cheminées d'évacuation.

iv. Turbo Séparateur Ventilé (TSV)

Le rôle principal du TSV est d'obtenir par une sélection pneumatique, une augmentation de la production ainsi qu'une meilleure qualité du produit. La capacité de production du TSV est de 250 t/h.

v. Criblage à 0,8mm

Cette opération permet d'obtenir un produit final à travers quatre cribles vibrants à résonance d'un débit horaire de 100 t/h et d'une maille de 0.8 mm. A cette étape on obtient un produit marchand dépoussiéré d'une classe granulométrique entre 80 et 800 µm avec une teneur supérieure à 63 % de TPL.

Les refus sont acheminés vers une trémie de déchargement pour les transporter par camions vers des terrils au niveau des espaces créés par l'exploitation minière.

2.2.2. Phase de transport du phosphate

Le transport du phosphate traité à partir du complexe de Bir El Ater est assuré par chemin de fer dans des wagons du type auto videur étanche et par rame composée de 34 wagons ou par l'entreprise Sotramine filiale du groupe FerPhos, dont l'objectif est de garantir le transport du produit fini jusqu'à l'installation portuaire au port d'Annaba par camions d'une capacité moyenne de 40t.

2.2.3. Phase de production des fertilisants

En plus des fertilisants à base d'azote, le complexe de production des fertilisants et des produits chimiques Ferial-Annaba assure la production des fertilisants phosphatés simple et les fertilisants mixtes. Le sous-système « Production des fertilisants » comprend plusieurs opérations unitaires qui sont regroupées dans des fonctions, où le tableau 22 donne une description.

Tableau 22. Description du sous-système : production des fertilisants phosphatés

Opérations unitaires étudiées	Fonctions accomplies
Stockage du phosphate ; broyage du phosphate ; dépoussiérage ; stockage du phosphate moulu.	1. Broyage du phosphate
Neutralisation ; granulation ; séchage ; classification ; refroidissement ; enrobage ; ensachage ; stockage de produit.	2. Production des fertilisants

Le phosphate arrive à l'entreprise avec une granulométrie qui varie entre 0,8 et 0,08 mm. Avant d'être utilisé dans le procédé de production des fertilisants, le phosphate est broyé à une classe granulométrique inférieure à 40µm.

2.2.3.1. Production du Triple Superphosphate (TSP)

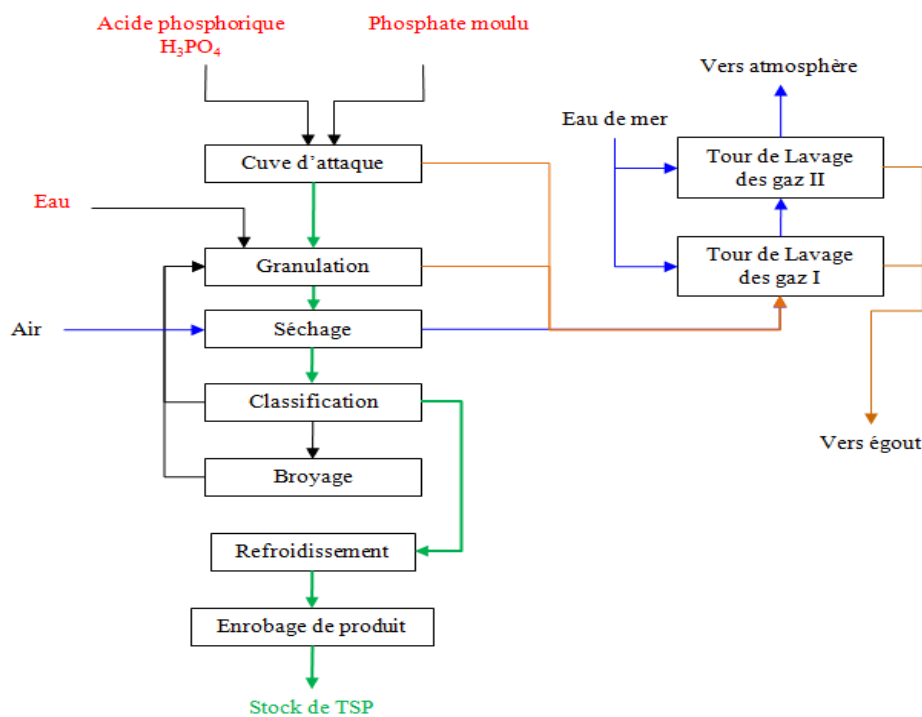


Fig. 33. Description du procédé de production du TSP

L'acide phosphorique à 52% de concentration est dilué avec de l'eau à 40% puis mélangé avec du phosphate moulu dans la cuve d'attaque. La température du mélange résultant doit rester entre 90 et 110°C. La figure 33 montre les différentes opérations de productions du TSP.

Dans la cuve d'attaque primaire agitée, la réaction phosphate-acide phosphorique est maintenue par injection d'ammoniac en plusieurs points du réacteur ; après un séjour de 30 mn, le mélange s'écoule directement dans la deuxième cuve agitée pour compléter la réaction

d'attaque. A la sortie de la deuxième cuve, le mélange obtenu, est déversé par gravité dans le tambour granulateur, et suit le même enchaînement des opérations dans l'unité NPK.

2.2.3.2. Production du Super Simple phosphate (SSP)

L'acide sulfurique dilué à 68% et refroidi à 70°C est mélangé avec du phosphate dépoussiéré moulu pour obtenir un produit SSP à 15% soluble dans l'eau sous forme de bouillie qui sera séchée pendant 30 mn, puis stockée pendant 21 jours pour mûrissement afin d'augmenter la teneur du produit en P_2O_5 assimilable à 18%. Cette poudre sera granulée dans l'unité NPK selon le procédé de production classique.

2.2.3.3. Production des fertilisants mixtes NPKch et NPKs

Le procédé de production des fertilisants NPKch & NPKs est le même utilisé pour la production des autres fertilisants (voir paragraphe III.2.2.3.5).

2.2.3.4. Production de la vapeur haute pression

a. Section de pompage eau de mer

Cette section est conçue pour satisfaire les besoins du complexe en eau de mer. Le pompage d'eau est fait à partir de la station de pompage au port d'Annaba. L'eau de mer pénètre dans la cheminée d'équilibre puis se déverse à travers des fenêtres placées à des hauteurs en fonction des débits et des priorités.

b. Section de dessalement de l'eau de mer

La section contient trois batteries de dessalement (évaporateur) d'eau de mer au débit de 200 t/h par unité, fonctionnant avec le système de distillation « multiflash », et une quatrième avec le système « *Éjectocompression* ». L'eau distillée est ensuite stockée dans des bacs de réserve.

c. Section de déminéralisation d'eau dessalée

Il existe deux chaînes de traitement des eaux, chaque chaîne est composée d'un filtre à charbon actif et d'un échangeur d'ions à lit mixte ; la chaîne devra traiter un débit de 70m³/h

d'eau déminéralisée.

d. Section Chaudière

Cette section est composée de trois chaudières de production de vapeur, deux « *Bab-Cook* » et la troisième « standard kcal » d'une capacité de production de 720 t/h, unité de pression 40 bars et température 42 °C.

La vapeur produite passe par barillet comme moyen de distribution à travers le complexe, cette vapeur est présentée au consommateur à différente pression (40, 13 et 0,7 bar) par détente.

e. Section turboalternateur

Une partie de la vapeur produite est orientée vers la section turbo, où elle passe par une turbine qui fait tourner un alternateur générant de l'électricité (5,5 kv) par la transformation d'énergie thermique en énergie mécanique dans la turbine. La section est composée de deux turbines, la première est une turbine à contre-pression avec une puissance de 10 Mw, et l'autre est une turbine à condensation d'une puissance de 18Mw.

f. Section compression d'air

Cette section a pour but de satisfaire le complexe en air comprimé (air de réserve et instrumentation). Il existe 3 compresseurs à double étage et effet avec un débit de 1070 Nm³ par unité. Une partie de cet air est utilisé comme air de réserve, le reste passe à travers des sècheurs d'air pour être utilisé comme air d'instrumentation.

2.3. Bilan quantitatif et qualitatif des entrées

2.3.1. Bilan d'entrée pour la phase d'extraction du phosphate

La quantité extraite du phosphate brut exploité au niveau de complexe de Djebel Onk est de 2528,09x10³ T, la production annuelle du phosphate marchand est de 785,909x10³t de 63/65% TPL et 745,930x10³t de 66/68% TPL. Le tableau 23 ci-dessous présente le bilan quantitatif de l'unité SRGA.

Tableau 23. Bilan d'entrée pour le sous-système : extraction du phosphate

Complexe de Djebel-Onk			
Produits consommés		Unité	Quantité par T
Explosifs		T	$0,607 \times 10^{-3}$
Gaz naturel		m ³	16,3
Gasoil	Calcination	L	7,68
	Parc engines		1,62
Électricité		MJ	68,4
Eau		L	0,52
Huiles de lubrification		L	$5,244 \times 10^{-3}$

2.3.2. Bilan d'entrée pour la phase de transport du phosphate

Les besoins en phosphate de l'entreprise Fertial-Annaba sont assurés par plusieurs sous-traitants privés. L'entreprise des fertilisants signe des contrats pour le transport de ses commandes.

La difficulté de collecte des données auprès des sous-traitants nous a conduits à nous approcher de la filiale de transport Sotramine pour pouvoir déterminer un bilan d'entrée, le choix Sotramine est représentatif, car elle utilise également le transport par camions (Tableau 24).

Tableau 24. Bilan d'entrée pour le sous-système : transport du phosphate

Moyen de transport	Entrée	Unité	Quantité par 1 T
Camion	Énergie primaire (gasoil +huile)	L/100km	$52,56 \times 10^{-3}$

2.3.3. Bilan d'entrée pour la phase de production des fertilisants

Le gaz naturel arrivant des champs de Hassi R'mel est la principale matière première du complexe d'Annaba ($449,94 \times 10^6$ Nm³ de gaz naturel consommé l'année 2010 dont $363,33 \times 10^6$ Nm³ pour l'unité NH₃).

2.3.3.1. Bilan d'entrée de l'unité de production de TSP

La production annuelle du TSP est de 7150 T. La consommation de gaz naturel est de $264\,550$ Nm³, et la consommation annuelle en eau est de $22\,020$ m³. Plus de détail sur l'inventaire d'entrée pour la production d'une tonne de TSP est dans le tableau 25.

Tableau 25. Bilan d'entrée pour la production du TSP

Produits consommés	Unité	Quantité par UF
Phosphate moulu	T	0,621
Acide phosphorique		0,383
Eau	m ³	3,079
Gaz naturel	Nm ³	37,051
Électricité	MJ	0,345

2.3.3.2. Bilan d'entrée de l'unité de production de SSP

La production annuelle de Fertil en SSP est de 2500T. La consommation en eau est de 800m³. Le tableau 26 ci-dessous montre l'inventaire d'entrée détaillé pour la production d'une tonne de SSP.

Tableau 26. Bilan d'entrée pour la production du SSP

Produits consommés	Unité	Quantité par UF
Phosphate moulu	T	0,650
Acide sulfurique		0,402
Eau	m ³	3,838
Gaz naturel	Nm ³	28
Électricité	MJ	0,753

2.3.3.3. Bilan d'entrée de l'unité de production de NPKs 3x15

La production annuelle de Fertil-Annaba en NPKs 3x15 est de 73700 T. La consommation annuelle de gaz naturel est de 1887x10³ Nm³. Le bilan d'entrée est montré au tableau 27 ci-dessous :

Tableau 27. Bilan d'entrée pour la production de NPKs 3x15

Produits consommés	Unité	Quantité par tonne
Phosphate moulu	T	0,124
Sulfate de potassium		0,305
Ammoniac		0,057
Acide phosphorique		0,121
Eau	m ³	2,97
Gaz naturel	Nm ³	26,157
Électricité	MJ	0,377

2.3.3.4. Bilan d'entrée de l'unité de production de NPKch 3x15

La production annuelle de Ferial-Annaba en NPKch 3x15 est de 4550 T. La consommation de gaz naturel est de 110150 Nm³, et la consommation en eau est de 12740m³. Dans le Tableau 28, les données détaillées d'inventaire d'entrée sont données.

Tableau 28. Bilan d'entrée pour la production de NPKch 3x15

Produits consommés	Unité	Quantité par tonne
Phosphate moulu		0,11
Chlorure de Potassium	T	0,281
Ammoniac		0,058
Acide phosphorique		0,119
Eau	m ³	2,8
Gaz naturel	Nm ³	24,733
Électricité	MJ	0,419

2.3.3.5. Bilan d'entrée de la Centrale Utilitaire II

L'activité principale du CU II est la production de la vapeur HP. La principale destination de cette vapeur est la section de dessalement d'eau de mer par une consommation annuelle de 457 788 T, la section de déminéralisation d'eau dessalée par 47 002 T ainsi que l'unité d'ammoniac par 206 366 T. Le tableau 29 ci-dessous montre le bilan quantitatif de la centrale.

Tableau 29. Bilan d'entrée pour la Centrale Unitaire II

Produits consommés	Unité	Quantité par tonne
Eau	m ³	1,331
Gaz naturel	Nm ³	125,672
Électricité	MJ	287,027

CHAPITRE 5

ÉVALUATION DE L'IMPACT ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

1. Évaluation des impacts liés à la production des fertilisants

L'industrie des fertilisants joue un rôle primordial dans le secteur de l'agroalimentaire en assurant un produit agricole de meilleure qualité. Le secteur des fertilisants est constitué de nombreuses unités constitutives. Chaque unité est caractérisée par la nature des matières premières utilisées et en conséquence par la qualité des rejets sous différentes formes : liquides, solides ou gazeuses.

Les rejets liés aux procédés de production, et qui sont émis dans le milieu naturel, même en petites quantités, peuvent engendrer des effets globaux ou spécifiques dans les trois compartiments (air, eau, et sol). Chaque résidu a un comportement spécifique dans le milieu naturel et contribue d'une façon unique dans une catégorie d'impact donnée.

La contribution de chaque résidu est difficile à déterminer par les méthodes d'évaluation classique, cela revient aux limites de ces méthodes dans le temps ou dans l'espace. La méthode d'évaluation environnementale par analyse de cycle de vie de produit est une méthode à prendre en considération lors de l'évaluation du cycle de vie de tous les procédés amonts utilisés pour fournir le produit, ainsi que tous les intrants au procédé de production objet d'étude, que soit direct ou indirect (description de la méthode dans le chapitre II).

D'après les directives de l'ACV, cette dernière est basée sur la réalisation d'un bilan quantitatif de tout le cycle de vie de produit, elle couvre un grand nombre d'impacts différents. L'ACV est la seule méthode capable de lier l'impact environnemental à l'unité fonctionnelle de produit.

Pour l'évaluation des impacts liés au secteur de production des fertilisants en Algérie, on fait recours à l'outil informatique GEMIS 4.7 qui est doté d'une base de données ACV de

produits, qui est principalement utilisé pour l'analyse des performances environnementales et l'utilisation de l'énergie. Deux catégories d'indicateurs d'impacts environnementaux sont distinguées dans notre étude : les indicateurs «Ressources» caractérisent les consommations réelles de ressources (matière première et énergie) qu'engendre le produit sur l'ensemble de son cycle de vie ; les indicateurs «Impacts» caractérisent les pollutions réelles et/ou potentielles générées par le produit sur l'ensemble de son cycle de vie.

Les résultats de l'étude ont été obtenus selon la méthode d'évaluation « CML » développée par l'Institut des sciences environnementales de l'université Leiden de Suède, version 2003. Cette méthode prend en considération l'impact engendré par le produit selon l'approche « problème » (Midpoint). GEMIS 4.7, évalue la charge environnementale du système objet d'étude sur quatre principaux impacts environnementaux :

- Potentiel de réchauffement climatique ;
- Potentiel d'acidification ;
- Potentiel précurseur d'ozone troposphérique ;
- Exploitation des ressources naturelles primaires.

1.1. Méthode de travail

Pour l'évaluation des impacts environnementaux des différents produits objet de l'étude : ammoniac, CAN, Sulfazot, TSP, SSP, NPK3x15ch, et NPK3x15s, nous avons fait appel à GEMIS 4.7. Ce logiciel est équipé d'une base de données qui compte plus de 9.000 modules.

GEMIS 4.7 est subdivisé en trois principaux axes (listes), produits, processus, et scénarios. La liste des produits est réservée pour exprimer les données générales et les métas données de produit lui-même, son poids spécifique, son PCI dans le cas échéant, ses propriétés chimiques, et physicochimiques, etc. La liste des processus donne le détail de la chaîne des procédés liés directement ou indirectement au produit, la liaison des différents procédés est donnée graphiquement sous forme d'un arbre des procédés de produit. La figure 34 ci-dessous montre un exemple de procédé de cycle de vie de NPK 3x15 à base de chlorure de potassium. La liste des scénarios quant à elle, donne une présentation des produits classés selon leurs

groupes d'industrie ou selon leurs natures. Dans la liste des scénarios, on peut effectuer l'évaluation d'impact graphique ou numérique, la comparaison des résultats en cas de comparaison entre deux scénarios, ou calculer la contribution du produit dans son groupe de production (la description de la méthode d'évaluation d'impact avec GEMIS 4.7 est expliquée dans l'annexe I).

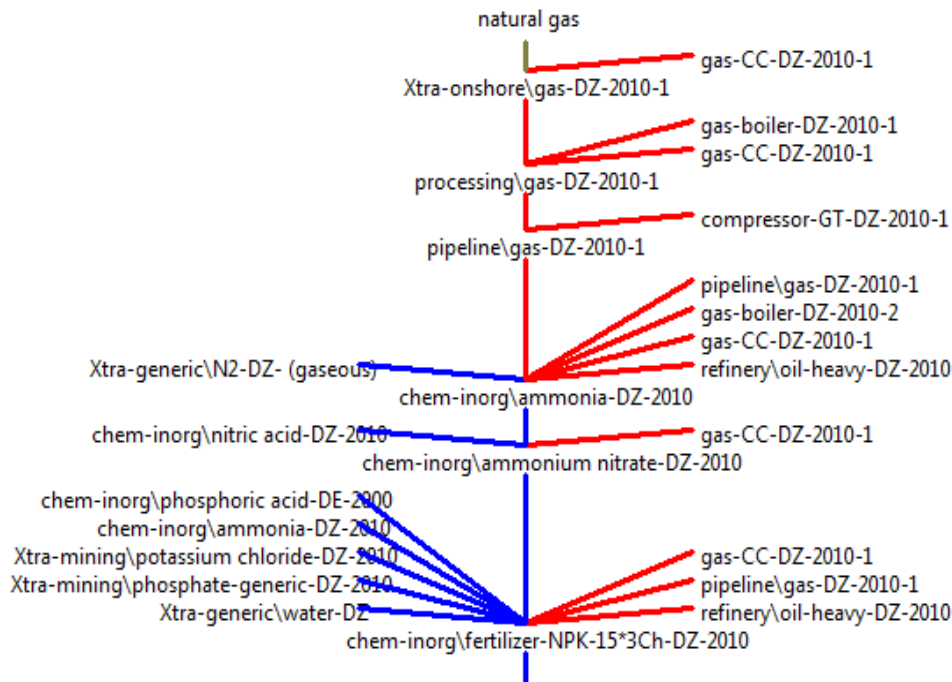


Fig. 34. Présentation graphique de l'arbre de procédé de production du NPK 3x15ch

1.2. Démarche d'évaluation d'impact

Lors de l'évaluation d'impact, les données de sortie sont affectées directement à l'unité fonctionnelle déterminée auparavant. Dans le cas de production d'un fertilisant à base d'azote comme le CAN 27% N, GEMIS 4.7 prend en compte la fraction d'impact liée aux processus amont comme l'ammoniac et l'acide nitrique. Bien que l'impact de production de l'ammoniac soit calculé à base de l'unité fonctionnelle de l'ammoniac qui est une tonne, et que la quantité d'ammoniac utilisée dans la production du CAN est beaucoup moins qu'une tonne. GEMIS 4.7 calcul l'impact lié à la quantité d'ammoniac utilisée dans le procédé de production de CAN et l'additionne au bilan d'impact global.

Pendant la phase d'évaluation d'impact lors d'une étude d'ACV, GEMIS 4.7 peut accomplir les étapes de choix de catégories d'impact, la classification, et la caractérisation

automatiquement et d'une façon autonome. Dans le cas où une substance peut avoir des impacts multiples, deux modes différents sont considérés par GEMIS :

- En parallèle : Une substance a deux impacts simultanés par exemple le NO_x qui contribuent dans l'acidification et la formation d'ozone troposphérique, ou le CH₄ qui contribue lui aussi dans la formation d'ozone troposphérique et le réchauffement climatique.

- En série : Une substance a un résultat nuisible qui devient la cause d'un autre problème. Par exemple, le SO₂ provoque une acidification, ce qui provoque une mobilisation de certains métaux, avec des effets négatifs sur l'écosystème et la santé humaine.

GEMIS 4.7 s'assure d'éviter la redondance des sources et des impacts liés. Dans le cas des impacts en parallèle, la même substance n'aura pas les deux impacts simultanément. Pour les impacts en série, GEMIS 4.7 s'assure de ne prendre qu'un des impacts pour éviter le double comptage.

2. Interprétation des résultats

2.1. Ammoniac

2.1.1. Potentiel de réchauffement climatique

Les principaux GES émis lors de la production de l'ammoniac sont le CO₂, N₂O et le CH₄. Le CO₂ présente 91,92%, le CH₄ 7,97% et le N₂O 0,1% de la quantité totale de GES émis qui sont de l'ordre de 1,44 t CO₂ eq/t d'ammoniac. La quantité de CO₂ émis est de 1,32 t/t d'ammoniac, elle est principalement générée à l'unité de production d'ammoniac ; son émission est due à la combustion de fuel gaz durant le reformeur primaire et secondaire de gaz de procédé par 93,4%, aux compresseurs utilisés pour le transport de gaz naturel par 4,18% et la génération de la vapeur HP dans les deux sites de production par 2,38%. La quantité de CH₄ générée tout au long du cycle de vie de l'ammoniac est de $4,606 \times 10^{-3}$ t, le CH₄ est émis pendant l'extraction de gaz naturel par 49,27%, son traitement par 49,2% et enfin son transport par 1,33%. L'émission de N₂O est de $4,883 \times 10^{-6}$ t/t d'ammoniac, sa génération est principalement due aux compresseurs utilisés dans le transport de gaz naturel par 86,5%, la production de vapeur HP par 13,15% et la génération d'électricité par 0,35%.

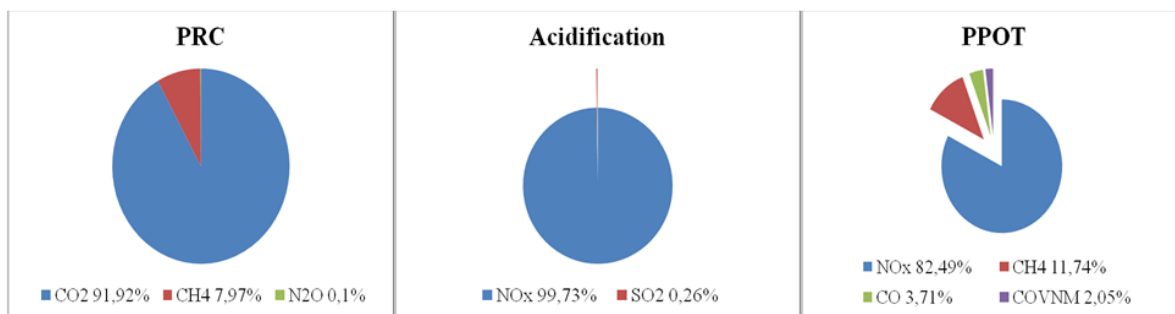


Fig. 35. Facteurs d'émission dans les catégories d'impact dans le procédé ammoniac.

2.1.2. Potentiel d'acidification

La production d'une tonne d'ammoniac contribue à l'acidification de l'atmosphère par $259,3 \times 10^{-6}$ g SO₂ eq. Les NO_x et le SO₂ sont les plus importants facteurs d'émission par 99,73% et 0,26% respectivement. La quantité émise des NO_x durant le cycle de vie de l'ammoniac est de $371,44 \times 10^{-6}$ t, ils sont causés par les compresseurs de transport de gaz naturel par 90,98%, pendant la production de vapeur HP par 8,64% et la génération d'électricité par 0,36%. La quantité de SO₂ est de $0,608 \times 10^{-6}$ t/t d'ammoniac, sa principale source est représentée par les compresseurs lors du transport de gaz par 63,3%, la production de vapeur HP par 36,09% et la génération d'électricité par 0,4%.

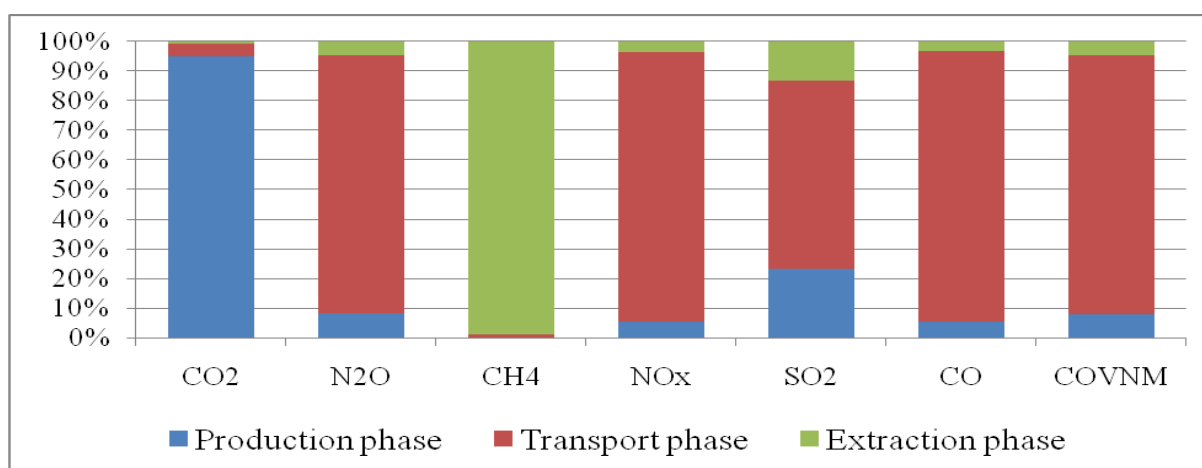


Fig. 36. Contribution de chaque substance dans les différentes phases de cycle de vie de l'ammoniac.

2.1.3. Potentiel précurseur d'ozone troposphérique

Le potentiel de formation d'ozone troposphérique est de $549,3 \times 10^{-6}$ t COVNM eq/t d'ammoniac, il est causé par génération des NO_x par 82,49%, le CH₄ par 11,74%, le CO et

COVNM par 3,71% et 2,05% respectivement. Le CO émis est de $185,32 \times 10^{-6}$ t/t d'ammoniac, sa génération est principalement liée aux compresseurs de gaz lors du transfert par 91,18%, la production de vapeur HP et d'électricité par 8,66% et 0,17% respectivement. La quantité émise des COVNM durant la production d'une tonne d'ammoniac est de $11,66 \times 10^{-6}$ t, leur émission est liée au transfert de gaz par 86,77%, la production de vapeur HP 12,86%, et la génération d'électricité par 0,27%.

2.1.4. Utilisation des ressources

La production d'une tonne d'ammoniac demande 2,15 t de ressources naturelles primaires. La consommation de gaz naturel (matière première) est de 0,518 t qui représente 27,34% de DMC. La consommation d'eau (utilisée principalement dans la production de vapeur) est de 1,06 t/t d'ammoniac qui présente 49,3% de DMC totale. La consommation d'air utilisée pour récupérer le N₂ est de 0,5 t/t d'ammoniac qui présente 23,25% de DMC totale (l'eau et l'air sont des DMC renouvelables).

La demande d'énergie est caractérisée par la consommation de gaz naturel. La production d'une tonne d'ammoniac nécessite 51,945 GJ de gaz naturel $\approx 1718,4 \text{ Nm}^3$ de gaz naturel (résultat basé sur le PCI⁴), dont une portion de 26,349 GJ qui présente 50,72% est utilisée comme matière première, et le reste (25,596 GJ ou 49,27%) est consommé comme gaz combustible. Cette dernière fraction, se constitue à son tour de 20,608 GJ soit 39,67% utilisée comme combustible de procédé et 0,167 GJ présentant 0,32% pour produire de la vapeur HP dans l'unité d'ammoniac, le reste soit 4,82 GJ qui présente 9,27% est consommée dans les processus amont (extraction et transport du gaz naturel, et génération d'électricité).

⁴ La quantité d'énergie utilisable contenue dans un combustible est typiquement calculée en utilisant le Pouvoir Calorifique Inferieur (PCI) du combustible. PCI du gaz naturel est : $33,0812 \text{ MJ/Nm}^3$, charbon : 26 MJ/kg et le pétrole : 41 MJ/kg (GEMIS 4.7, 2011 ; ADEME, 2007).

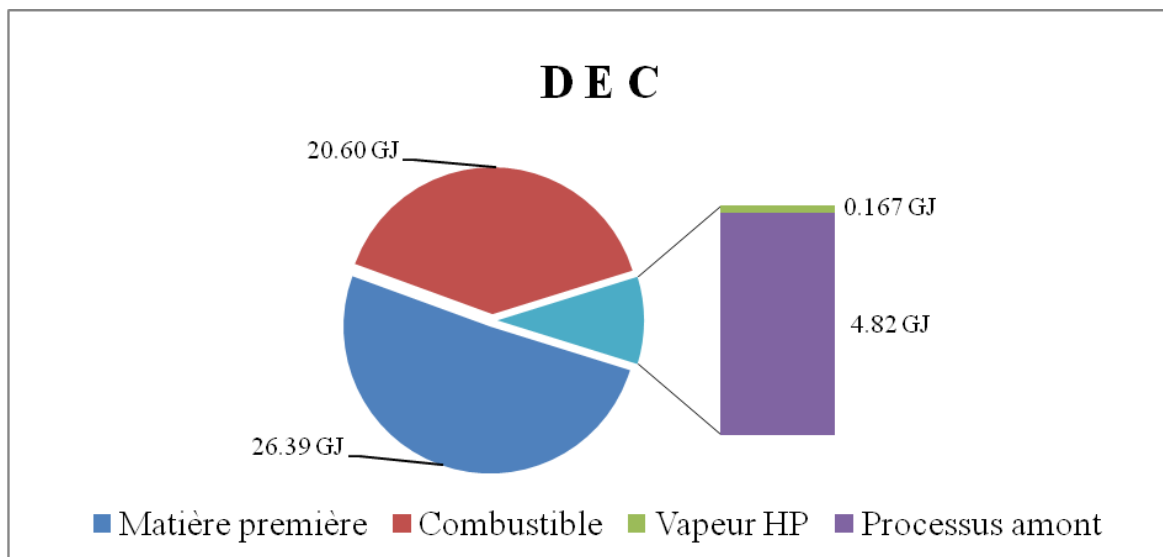


Fig. 37. Description de la demande d'énergie cumulée pour le cycle de vie de l'ammoniac.

2.2. Acide nitrique

2.2.1. Potentiel de réchauffement climatique

La quantité totale des GES émise lors de la production d'une tonne d'acide nitrique est de 2,28 t CO₂ eq. Les principaux GES sont le CO₂, le N₂O et le CH₄, le CO₂ présente 26,12%, le N₂O 71,81% et le CH₄ 2%. La quantité de CO₂ totale émise est de 0,596 t/t de HNO₃, sa génération est due à la production d'ammoniac par 58,68%, la génération d'électricité par 34,06%, les compresseurs de transfert du gaz naturel par 3,65%, et la production de vapeur HP dans les deux sites de production par 3,15%. Le N₂O est émis à l'ordre de 5,511x10⁻³ t/t d'acide nitrique, il est principalement généré lors de la production de l'acide nitrique par 99,79% et la génération d'électricité par 0,168%. La quantité de CH₄ est de 1,828 x10⁻³ t/t, il est principalement émis lors de l'extraction et le traitement du gaz naturel par 97,5%, lors de son transfert par 1,31%, et pendant la génération d'électricité par 0,846%.

2.2.2. Potentiel d'acidification

La production d'une tonne d'acide nitrique contribue au potentiel d'acidification de l'ordre de 259,4x10⁻⁶ SO₂ eq. Les NO_x sont les principales substances émises par 94,73% et le NH₃ par 5,19%. Les NO_x sont générés lors de la production d'acide nitrique par 81,14%, la production d'électricité par 15,69%, et par les compresseurs utilisés lors du transfert du gaz naturel par 2,69%.

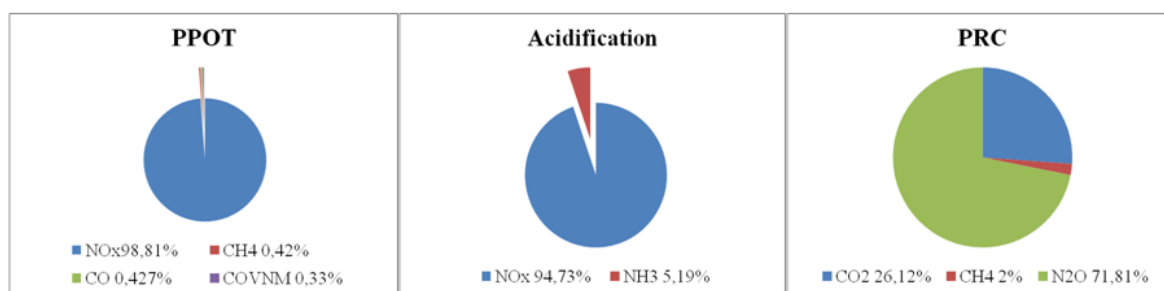


Fig. 38. Facteurs d'émission dans les catégories d'impact dans le procédé d'acide nitrique

2.2.3. Potentiel précurseur d'ozone troposphérique

La production d'acide nitrique contribue à la production de l'ozone troposphérique par $6,08 \times 10^{-3}$ t COVNM éq. Les principales substances sont les NOx, le CH₄, CO et COVNM par 98,81%, 0,42%, 0,427%, et 0,33% respectivement.

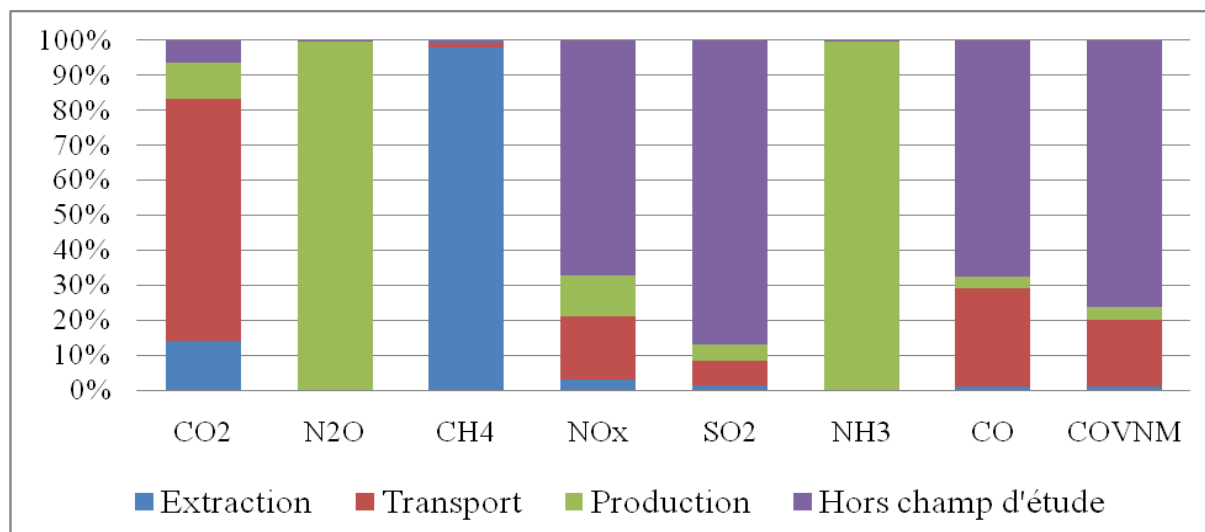


Fig. 39. Contribution des substances dans les différentes phases du cycle de vie d'HNO₃

2.2.4. Utilisation des ressources

La production d'une tonne d'acide nitrique demande 7,47 t des ressources naturelles primaires. La quantité consommée de matière première de gaz naturel est de 0,166 t (DMC non renouvelable), qui représente 2,22% de DMC. L'eau est principalement utilisée dans la production de vapeur, sa quantité consommée est de 2,1t qui présente 28,11% de DMC totale. L'air est utilisé pour produire l'acide nitrique (O₂) il est consommé de l'ordre de 5,2 t/t d'acide nitrique qui présente 69,61% de DMC totale.

La demande d'énergie dans le procédé de production d'acide nitrique est de l'ordre de 20,42 GJ/t, 36,43% de cette quantité soit 7,44 GJ est utilisée comme matière première, le reste est consommé comme fuel dans les procédés de production. Le gaz est la principale source d'énergie utilisée par 20,41 GJ soit 99,95%. La quantité du charbon et du pétrole est de 3,98 MJ et 4,04 MJ respectivement, ensemble ils ne dépassent pas 0,2% de DEC totale.

2.3. Calcium ammonium nitrate « CAN »

2.3.1. Potentiel de réchauffement climatique

La production d'une tonne de CAN (27% N) contribue au réchauffement climatique par la génération des GES par la proportion de 1,862 t CO₂ éq. Les principaux gaz à effet de serre sont le CO₂, N₂O et le CH₄ ; le CO₂ présente 34,67%, le N₂O 62,55% et le CH₄ 2,76% de la quantité totale émise. Le CO₂ est généré principalement dans l'unité de l'ammoniac, son émission est due à la combustion de fuel gaz pendant le reforming de gaz de procédé par 70,15%, la seconde source d'émission de CO₂ est la génération d'électricité par 22,59%, les compresseurs utilisés dans le transport du gaz par 3,81%, la production de vapeur dans les deux sites de production par 3,07%. L'extraction et le traitement du gaz naturel sont responsables de 97,91% de CH₄ émis dans l'atmosphère, et son transport par pipeline de 1,31%, et la génération d'électricité de 0,53%. La génération de N₂O est principalement due à la production de l'acide nitrique par 99,76% et à la génération d'électricité par 0,17%.

2.3.2. Potentiel d'acidification

La production d'une tonne de CAN (27% N), contribue à l'acidification de l'atmosphère par $2,633 \times 10^{-3}$ t SO₂ éq ; les principaux éléments contribuant sont les NO_x 94,82% et le NH₃ 5,06%. Les NO_x sont générés principalement lors de la production de l'acide nitrique par 79,11%, lors de la génération d'électricité par 15,49%, et par les compresseurs de gaz lors du transport par pipeline 4,18%, lors de la production de vapeur dans les deux sites de production 1,09%. L'émission de NH₃ est due principalement à la production de l'acide nitrique par 99,99%.

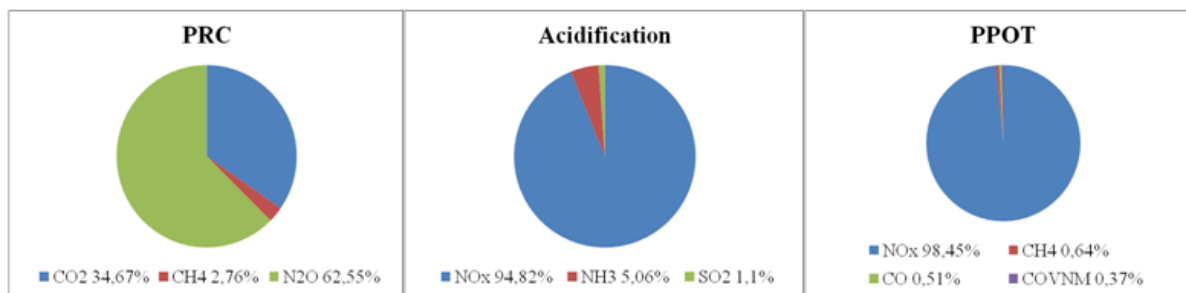


Fig. 40. Facteurs d'émission dans les catégories d'impact dans le procédé CAN 27% N

2.3.3. Potentiel précurseur d'ozone troposphérique

La production de CAN contribue à la production de l'ozone troposphérique par $4,443 \times 10^{-3}$ t COVNM éq. Les principaux facteurs d'émission sont les NOx à raison de 98,45%, le CH₄ 0,64%, le CO 0,51% et les COVNM 0,37%. L'émission des COVNM est due à la génération d'électricité par 66,21%, les compresseurs de gaz naturel par 25,89%, la production de vapeur dans les deux sites de production par 5,41%, le transport par camion de carbonate de calcium par 1,51%, et enfin, l'utilisation des explosifs lors de l'extraction du carbonate de calcium par 0,81%.

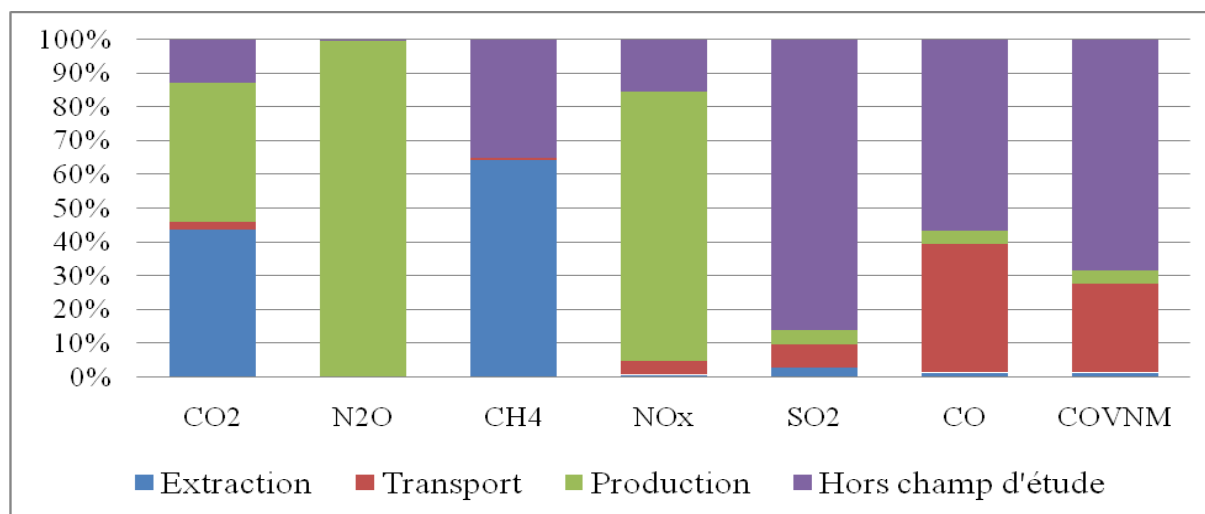


Fig. 41. Contribution des substances dans les différentes phases du cycle de vie du CAN

2.3.4. Utilisation des ressources

La demande de matériau cumulée (DMC) est de 6,07 t/t de CAN, les ressources renouvelables (l'eau et l'air) présentent 92,75% de DMC soit 1,86 t d'eau et 3,77 t d'air. Les ressources non renouvelables sont caractérisées par l'utilisation de gaz naturel et l'épuisement

des minéraux (carbonate de calcium) par 0,21 t et 0,22t de CaCO₃ soit 6,09%.

La demande d'énergie cumulée (DEC) est de 23,12 GJ/t de CAN, cette quantité est utilisée principalement pour fournir de l'énergie au système (la génération d'électricité, la production de vapeur), les énergies non renouvelables (gaz, pétrole et charbon) présentent 99,99% de DEC, la quantité consommée de gaz naturel est de 23,09 GJ soit 99,87% de DEC totale, la consommation du charbon et de pétrole ne dépasse pas 3,06 MJ et 26,89 MJ respectivement soit 0,01% et 0,11% de DEC totale.

2.4. SULFAZOT

2.4.1. Potentiel de réchauffement climatique

La production d'une tonne de Sulfazot contribue au réchauffement climatique par génération des GES par 8,649 t CO₂ éq. Les principaux gaz à effet de serre sont le CO₂, N₂O et le CH₄, le CO₂ présente 39,55%, le N₂O 59,44% et le CH₄ 1 %.

Le CO₂ est généré principalement au niveau de l'unité ammoniac lors de la combustion de gaz combustible et la décarbonisation du gaz de procédé 25,31%, le séchage de produit fini dans l'unité NPK par 70,19%, la génération d'électricité 2,39%, le reste est émis par les compresseurs de transfert de gaz par 1,32% et la production de vapeur dans les sites de production 0,837%. La génération de N₂O est due principalement au séchage de Sulfazot 87,51% et la production de l'acide nitrique 12,46%. 94,82% du CH₄ est généré lors de l'extraction et le traitement du gaz naturel au champ d'exploitation, lors de la production de Sulfazot par 3,7%, et lors de transport de gaz par 1,43%.

2.4.2. Potentiel d'acidification

La production de Sulfazot contribue à l'acidification de l'atmosphère par $29,728 \times 10^{-3}$ t SO₂ éq ; les principaux éléments contribuant sont les NO_x 39,08%, NH₃ 42,57% et SO₂ 18,2%. Les NO_x sont générés principalement à la granulation et au séchage de Sulfazot à l'unité NPK par 87,08%, lors de l'absorption et le blanchiment de l'acide nitrique par 9,37% et lors de la génération d'électricité par 1,87%, et par les compresseurs de transport de gaz naturel par 1,65%. L'émission de l'ammoniac NH₃ est généralement lors du séchage de

Sulfazot 99,41% et la production de l'acide nitrique par 0,58%. Le SO₂ est généré lors de la production de Sulfazot par 74,46% et la production de l'acide sulfurique par 25,15%.

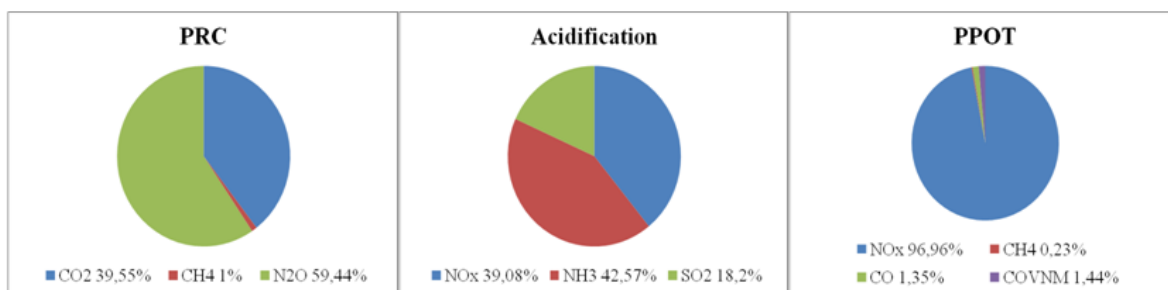


Fig. 42. Facteurs d'émission dans les catégories d'impact dans le procédé de Sulfazot

2.4.3. Potentiel précurseur d'ozone troposphérique

La production d'une tonne de Sulfazot contribue dans le potentiel de formation d'ozone troposphérique par $20,996 \times 10^{-3}$ t COVNM éq, la formation de l'ozone troposphérique est provoquée par génération des NO_x à raison de 96,96%, de CH₄ 0,23%, de CO 1,35% et COVNM 1,44%. La génération de CO est principalement au niveau de l'unité NPK (granulation et séchage de produit fini) par 92,26%, les compresseurs utilisés dans le transfert de gaz naturel par 4,31%, et la génération d'électricité par 2,25% et la production de vapeur dans les deux sites industriels par 0,38%. L'émission des COVNM est au niveau de l'unité NPK par 95,03%, la génération d'électricité par 2,06% et les compresseurs de transport de gaz naturel par 2,27%.

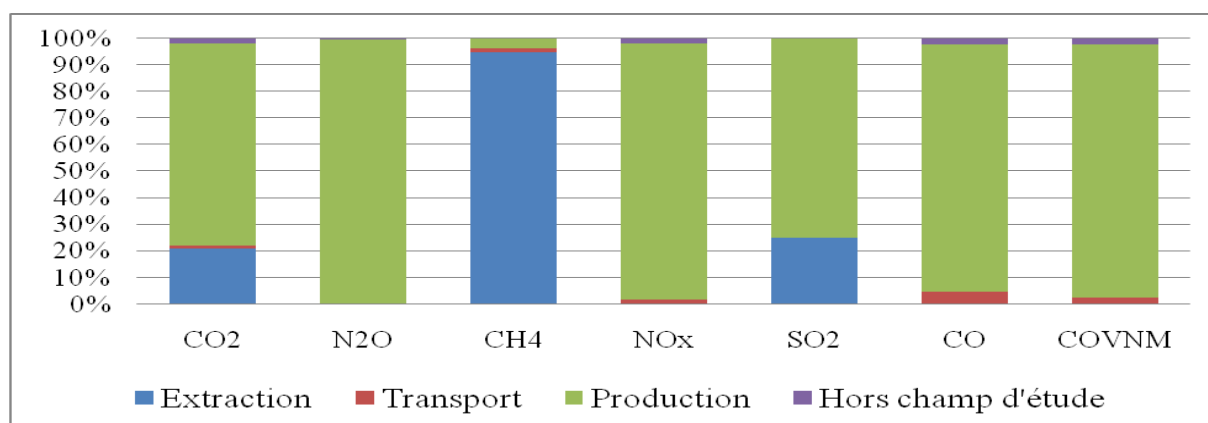


Fig. 43. Contribution des substances dans les différentes phases du cycle de vie du Sulfazot

2.4.4. Utilisation des ressources

La demande de matériau cumulée (DMC) est de 23,51 t/t de Sulfazot, les ressources renouvelables (l'eau et l'air) présentent 97,44% de DMC soit 20,56 t d'eau et 2,35 t d'air, les ressources non renouvelables sont caractérisées par l'utilisation de gaz naturel par 0,443 t soit 1,88%.

La demande d'énergie cumulée (DEC) est de 40,7 GJ/t de Sulfazot, les énergies non renouvelables (gaz, pétrole et charbon) présentent 99,99% de DEC, la quantité consommée de gaz naturel est de 41,8 GJ/t, le charbon -1,2GJ/t, le pétrole -10GJ/t, la quantité demandée du gaz naturel dépasse le bilan énergétique global, car les bilans du charbon et du pétrole sont négatifs (un procédé amont du Sulfazot est un générateur d'énergie).

2.5. Triple superphosphate « TSP »

2.5.1. Potentiel de réchauffement climatique

La production d'une tonne de TSP contribue au réchauffement climatique par la génération de 1,902 t CO₂ éq des gaz à effet de serre. Les principaux gaz à effet de serre sont le CO₂, N₂O et le CH₄, le CO₂ présente 94,1%, le N₂O 4,78% et le CH₄ 1,1%.

Le CO₂ est généré principalement au processus amont (centrale électrique à charbon utilisée dans l'usine de l'acide phosphorique) par 60,45%, la production du TSP par 28,66%, lors du raffinage des huiles industrielles par 7,44%, lors du transport par camion du phosphate brute dans la carrière par 1,6%, et le transport du phosphate vers l'usine de production des fertilisants par 0,453%.

Le CH₄ est généré principalement par la centrale électrique utilisée dans la production de l'acide phosphorique (l'acide phosphorique n'est pas produit en Algérie) par 95,9% et enfin l'extraction et le traitement de gaz naturel par 4,04%. La génération de N₂O est due à l'extraction du charbon utilisé dans la production de l'acide phosphorique par 54,91%, la production du TSP par 38,13%, la chaudière à huile dans l'usine de production de l'acide phosphorique par 3,53%, la production de l'acide nitrique par 3,09% et le transport par camion du phosphate dans la carrière d'exploitation du phosphate par 1,19%.

2.5.2. Potentiel d'acidification

La production d'une tonne de TSP contribue à l'acidification de l'atmosphère par $33,64 \times 10^{-3} \text{ t SO}_2 \text{ eq}$, les principaux éléments contribuant sont le SO_2 par 71,16%, le NO_x par 27,33% et le HCl par 1,2%.

La production du TSP contribue à la génération de SO_2 par 45,52%, le générateur électrique à charbon dans l'usine de l'acide phosphorique par 36,68%, la production de l'acide sulfurique par 10,68% et la chaudière à huile dans l'usine de l'acide phosphorique par 7,01%. Les NO_x sont générés principalement lors de la production de TSP par 58,6%, la génération d'électricité par la centrale à charbon par 37,74% et le transport du phosphate dans la carrière par 2,85%. L'émission de HCl est principalement due à la génération d'électricité par la centrale à charbon utilisée dans l'usine de production de l'acide phosphorique par 99,99%.

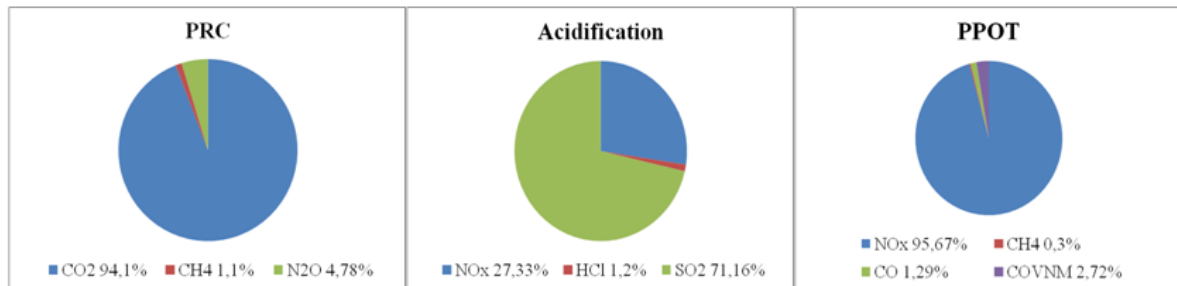


Fig. 44. Facteurs d'émission dans les catégories d'impact dans le procédé de TSP

2.5.3. Potentiel précurseur d'ozone troposphérique

La production d'une tonne de TSP contribue dans le potentiel de formation d'ozone troposphérique par $16,841 \times 10^{-3} \text{ t COVNM eq}$, la formation d'ozone troposphérique est provoquée par génération des NO_x à raison de 95,67%, de CH_4 0,301%, de CO 1,29% et COVNM 2,72%. La génération de CO est due principalement à la production de TSP par 60,41%, la génération d'électricité par la centrale à charbon par 29,36%, la chaudière à huile par 5,13%, le transport du phosphate dans la carrière par 4,11% et la production des explosifs par 0,829%. Les COVNM sont générés essentiellement lors de production de TSP par 82,92%, la génération d'électricité par la centrale à charbon par 5,42%, le raffinage des huiles industrielles par 5,99%, le transport du phosphate vers l'usine de production des fertilisants par 1,09%, et lors de transport du phosphate dans la carrière par 0,79%.

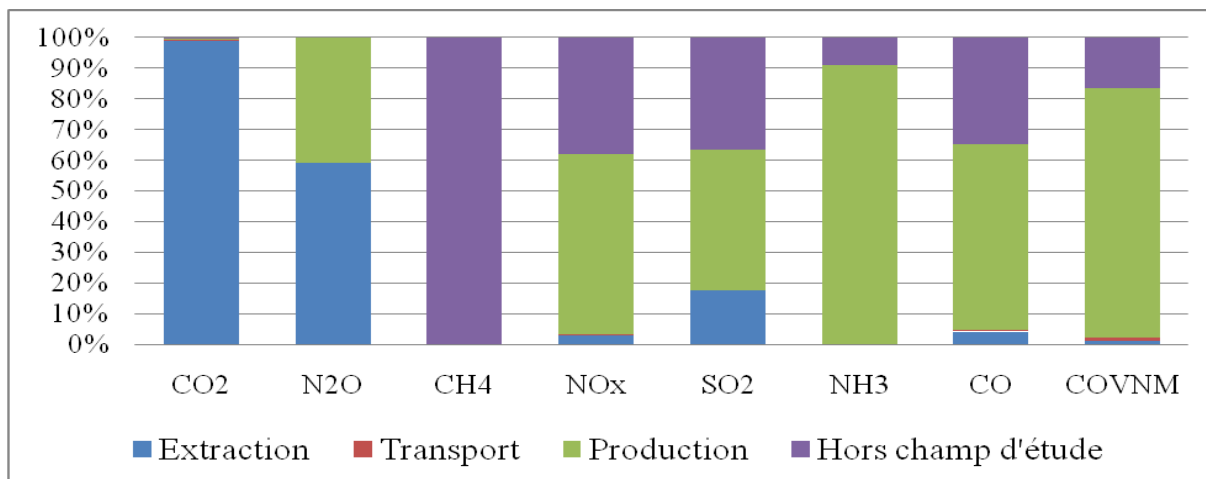


Fig. 45. Contribution des substances dans les différentes phases cycle de vie de TSP

2.5.4. Utilisation des ressources

La demande de matériau cumulée (DMC) est de 70,759 t/t de TSP, les ressources renouvelables (l'eau et l'air) présentent 97,94% de DMC soit 69,301 t d'eau et $1,544 \times 10^{-3}$ t d'air, l'utilisation des ressources non renouvelables est caractérisée par la consommation de gaz naturel par $0,277 \times 10^{-3}$ t soit 0,001% est les minéraux (phosphate) par 1,24 t soit 1,75%.

La demande d'énergie cumulée (DEC) est de 13,178 GJ/t de TSP, cette quantité est utilisée principalement pour fournir de l'énergie au système (la génération d'électricité, la production de vapeur), l'énergie non renouvelable (gaz, pétrole et charbon) présente 99,779% de DEC, la quantité consommée de gaz naturel est de 778,278 MJ soit 5,903% de DEC totale, la consommation du charbon et de pétrole est de 9,534 GJ et 2,657 GJ respectivement soit 72,347% et 20,162% de DEC totale.

2.6. Super simple phosphate « SSP »

2.6.1. Potentiel de réchauffement climatique

La production d'une tonne de SSP contribue au réchauffement climatique par la génération de 1,018 t CO₂ éq des gaz à effet de serre. Les principaux gaz à effet de serre sont le CO₂, CH₄ et N₂O, le CO₂ présente 98,41%, le CH₄ 0,35 et le N₂O 1,22%.

La principale source de CO₂ est la granulation de SSP poudre par 63,42%, la production de la poudre SSP par 35,04%, le transport du phosphate brut dans la carrière par 0,47%, et

enfin, le transport routier du phosphate par 0,41%. Le N₂O est émis lors de la production de la poudre SSP à l'ordre de 34,37%, la granulation et le séchage à l'unité NPK par 62,21%, la production de l'acide nitrique par 1,71% et lors du transport du phosphate dans la carrière par 0,56%, et enfin, lors de la génération d'électricité par 0,5%. Le CH₄ est émis lors de son extraction et traitement par 67,13%, le transport du gaz par pipeline par 3,01%, la production de la poudre SSP par 8,59%, la granulation de la poudre par 15,63%, et lors de raffinage des huiles industrielles par 5,59%.

2.6.2. Potentiel d'acidification

La production d'une tonne de SSP contribue à l'acidification de l'atmosphère par 26,160x10⁻³t SO₂éq, les principaux éléments contribuant sont le SO₂ par 67,86%, le NO_x par 31,97% et le NH₃ par 0,141%.

Le SO₂ est généré lors de la production du SSP poudre par 33,91%, la granulation du produit fini par 61,39% et la production de l'acide sulfurique par 4,07. Les NO_x sont générés essentiellement lors de la production de SSP poudre par 35,18%, la granulation de produit fini par 64,03% et le transport du phosphate par camion par 0,565%. L'émission de NH₃ est principalement liée à la production de SSP poudre à raison de 34,32% et la granulation du produit fini par 65,35%.

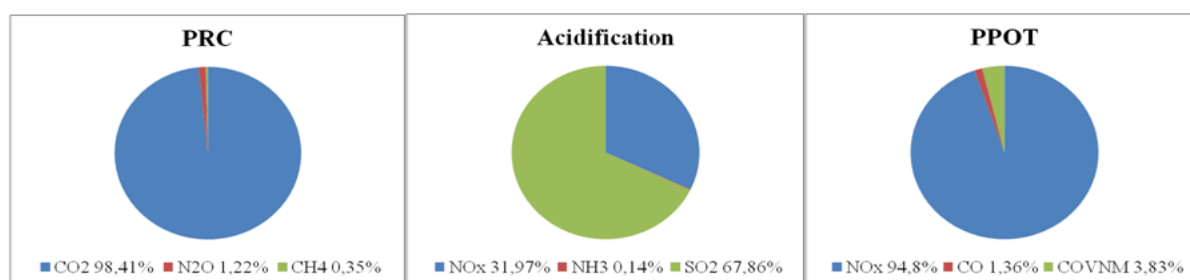


Fig. 46. Facteurs d'émission dans les catégories d'impact dans le procédé de SSP

2.6.3. Potentiel précurseur d'ozone troposphérique

La production d'une tonne de SSP contribue dans le potentiel de formation d'ozone troposphérique par 15,462x10⁻³t COVNM eq, la formation d'ozone troposphérique est provoquée par génération des NO_x à raison de 94,8%, de CO 1,36% et COVNM 3,83%.

La production de SSP poudre et la granulation du produit fini contribue à l'émission de CO par 34,18% et 63,5% respectivement et le transport du phosphate dans la carrière par 0,76%. La génération des COVNM est principalement due à la production de SSP poudre et la granulation de ce dernier par 35,45% et 63,17% respectivement et le transport de phosphate par camion vers l'usine de production des fertilisants par 0,46%.

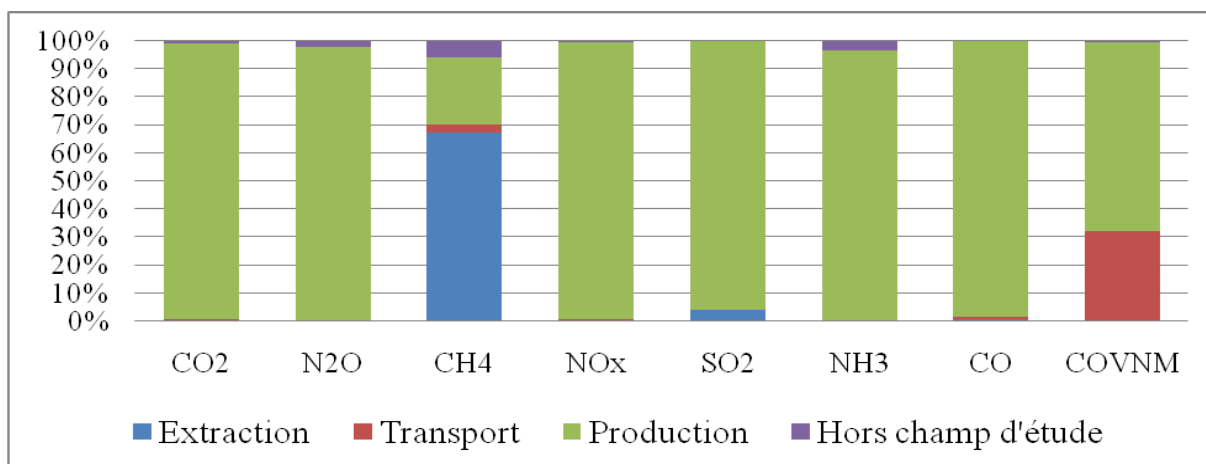


Fig. 47. Contribution des substances dans les différentes phases du cycle de SSP

2.6.4. Utilisation des ressources

La demande de matériau cumulée (DMC) est de 6,43 t/t de SSP, les ressources renouvelables (l'eau et l'air) présentent 95,17% de DMC soit 6,15t d'eau et $0,83 \times 10^{-3}$ t d'air, les ressources non renouvelables sont caractérisées par l'utilisation des minerais (principalement phosphate) par 0,305t soit 4,74%.

La demande d'énergie cumulée (DEC) est de 1,465 GJ/t de SSP, la quantité des énergies non renouvelables consommées dans le procédé (gaz, charbon et pétrole) est de 1,46 GJ soit 99,65% de DEC totale, la quantité consommée de gaz naturel est de 1,19 GJ, la consommation du pétrole est de 251 MJ, et le charbon est de 6,46 MJ/t de SSP.

2.7. Fertilisant mixte« NPK 15x3ch »

2.7.1. Potentiel de réchauffement climatique

La production d'une tonne de NPK 15x3ch contribue au réchauffement climatique par génération des gaz à effet de serre de l'ordre de 2,99 t CO₂ éq, les principaux gaz à effet de

serre émis à cause de la production de NPK 15x3ch sont le CO₂, CH₄ et N₂O, le CO₂ présente 71,7%, le N₂O 24,17% et le CH₄ 4,12%.

Le CO₂ est généré principalement pendant la production de l'ammoniac de l'ordre de 43,76%, la granulation et le séchage de produit fini par 32,27%, lors de la génération d'électricité dans la centrale à charbon à l'usine de production de l'acide phosphorique par 16,53%. La génération d'électricité pour les deux sites de production locaux contribue par 4,14%, les compresseurs de transport de gaz naturel par 2,12%, la chaudière de production de vapeur à huile dans l'usine hors le champ d'étude 2,43%, et enfin, la génération de vapeur dans les sites de production locaux 1,36%.

L'extraction et le traitement de gaz naturel au niveau de champ de Hassi R'mel contribuent à l'émission de CH₄ par 75,7%, l'extraction de charbon utilisé dans la centrale électrique par 23,1% et pendant le transport de gaz naturel gazoduc par 1,01%. L'essentiel des émissions de N₂O est dû à la production de l'acide nitrique par 97,97%, la production de NPK 15x3ch par 1,16% et la génération d'électricité dans la centrale à charbon par 0,49%.

2.7.2. Potentiel d'acidification

La production d'une tonne de NPK 15x3ch contribue à l'acidification de l'atmosphère par $23,445 \times 10^{-3}$ t SO₂ eq, les principaux éléments contribuant sont le SO₂ par 63,84%, le NO_x par 35,04%, et le NH₃ par 0,44%.

La production de NPK 15x3ch contribue à l'émission de 65,58% de la quantité totale des NO_x, la production de l'acide nitrique par 14,64%, la centrale électrique à charbon par 13,18%, les compresseurs de transport de gaz naturel par 2,35% et la génération d'électricité locale par 2,86%. L'émission de SO₂ est due généralement au séchage de produit fini par 72,81%, la génération d'électricité par la centrale à charbon par 18,31%, la production de l'acide sulfurique par 5,03% et la production de vapeur par chaudière à huile dans l'unité de production de l'acide phosphorique par 3,5%. La production de l'acide nitrique et le NPK15x3ch sont les deux sources essentielles de NH₃ par 77,948% et 22,013%.

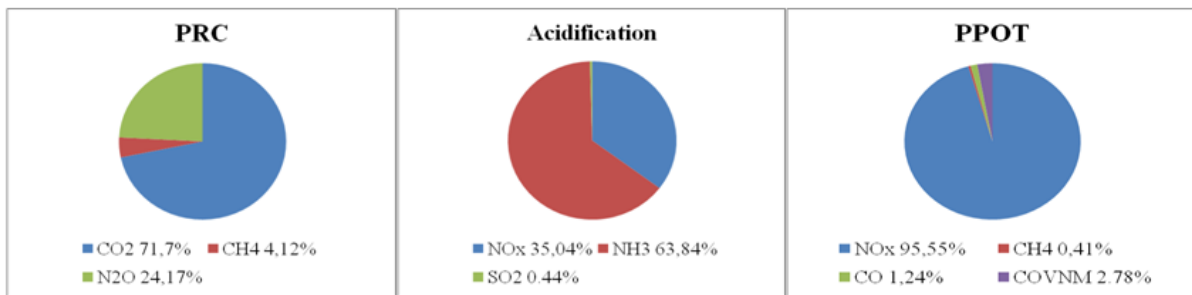


Fig. 48. Facteurs d'émission dans les catégories d'impact dans le procédé NPK 3x15ch

2.7.3. Potentiel précurseur d'ozone troposphérique

La production d'une tonne de NPK 15x3ch contribue à la formation d'ozone troposphérique par $15,024 \times 10^{-3}$ t COVNM eq, les facteurs d'émission pour le potentiel de formation d'ozone troposphérique sont les NO_x à raison de 95,55%, le CH₄ 0,41% le CO 1,24% et COVNM 2,78%.

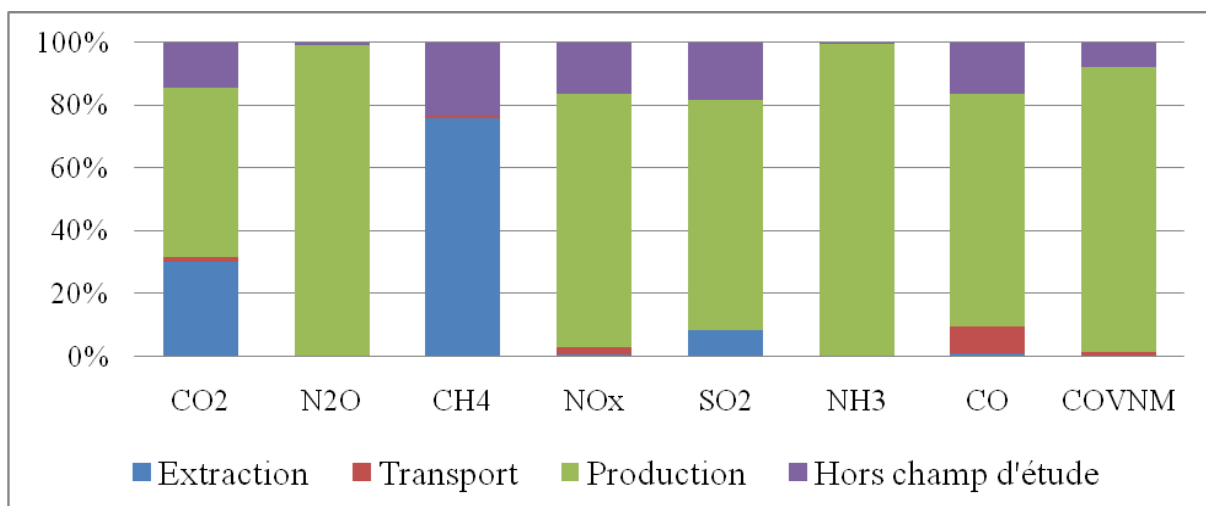


Fig. 49. Contribution des substances dans les différentes phases du cycle de vie de NPK 3x15ch.

La production de produit fini contribue à l'émission de 73,95% de CO, la centrale électrique à charbon par 11,41%, les compresseurs de transport de gaz naturel par 8,15%, la génération d'électricité locale (à gaz naturel) par 4,77%, la production de vapeur dans la chaudière à huile par 2,23%, le transport de phosphate par camion dans la carrière d'extraction par 1,32%. L'émission des COVNM est due principalement à la production de NPK 15x3ch par 90,92%, la génération d'électricité par la centrale à charbon par 1,856%, la génération d'électricité locale par 1,615%, les compresseurs de transport de gaz naturel par 1,461% et le raffinage des

huiles industrielles par 1,206%.

2.7.4. Utilisation des ressources

La Demande de Matériau Cumulée (DMC) est de 84,088 t/t de NPK15x3ch, les ressources renouvelables (l'eau et l'air) présentent 98,798% de DMC soit 80,514 t d'eau et 2,564 t d'air, les ressources non renouvelables sont caractérisées par l'utilisation de gaz naturel qu'elle est de 0,334 t soit 0,397%.

La Demande d'Energie Cumulée (DEC) est de 41,395 GJ/t de NPK15x3ch, les énergies non renouvelables (gaz, pétrole et charbon) présentent 99,97% de DEC, la quantité consommée de gaz naturel est de 37,526 GJ soit 90,65% de DEC totale, la consommation du charbon et de pétrole est de 2,99 GJ et 0,76 GJ respectivement soit 7,235% et 1,838% de DEC totale.

2.8. Fertilisant mixte « NPK 15x3s»

2.8.1. Potentiel de réchauffement climatique

La production d'une tonne de « NPK 15x3s » contribue au réchauffement climatique par génération des gaz à effet de serre de l'ordre de 2,955 t CO₂ eq, les principaux gaz à effet de serre émis à cause de la production de « NPK 15x3s » sont le CO₂, CH₄ et N₂O, le CO₂ présente 71,49%, le N₂O 24,44% et le CH₄ 4,06%.

La génération de CO₂ est due principalement à la production de l'ammoniac par 42,35%, la production de NPK 15x3s par 32,24%, la génération d'électricité dans la centrale à charbon (les processus hors le champ d'étude) par 16,02%, la génération d'électricité pour les unités de production locales par 4,26%. La chaudière à huile pour la production de vapeur dans l'unité de production de l'acide phosphorique contribue par 1,99%, les compresseurs utilisés dans le transport du gaz par 2,16% et la production de vapeur dans l'usine d'Annaba par 0,85%. L'émission de CH₄ est due à la l'extraction de gaz naturel et son traitement au niveau du champ de Hassi R'mel par 75,2%, l'extraction du charbon utilisé dans la génération d'électricité (hors le champ d'étude) par 23,2%, le transport de gaz naturel par pipeline par 1,04%, et la production de NPK 3x15s par 0,5%. La génération de N₂O est due à la

production de l'acide nitrique par 98,01%, la production du produit fini (NPK 15x3s) par 1,16%, la centrale de génération d'électricité à charbon par 0,54% et la génération d'électricité par 0,16%.

2.8.2. Potentiel d'acidification

La production d'une tonne de NPK 3x15s contribue à l'acidification de l'atmosphère par $23,859 \times 10^{-3}$ t SO₂ eq, les principaux éléments contribuant sont le SO₂ par 64,53%, le NO_x par 34,38% et le NH₃ par 0,43%.

Le SO₂ est généré lors de la production de « NPK 15x3s » par 70,79%, la génération d'électricité dans la centrale à charbon par 18,06%, la production de l'acide sulfurique par 8,002 % et la production de vapeur dans la chaudière à huile par 3,25%. Les NO_x sont générés principalement à la production de « NPK 15x3s » par 65,68%, la production de l'acide nitrique par 14,66%, la génération d'électricité dans la centrale à charbon et à la centrale à gaz naturel (électricité locale) par 13,39% et 2,91% respectivement et par les compresseurs pour le transport de gaz naturel par 2,35%. L'émission de NH₃ est essentiellement due à la production de l'acide nitrique et la production de « NPK 15x3s » par 77,94% et 22,01% respectivement.

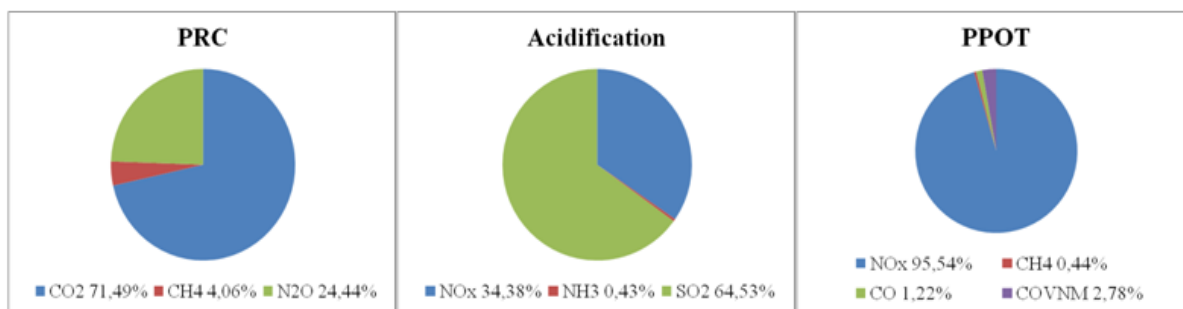


Fig. 50. Facteurs d'émission dans les catégories d'impact dans le procédé de NPK3x15s

2.8.3. Potentiel précurseur d'Ozone Troposphérique

La production d'une tonne de NPK 15x3s contribue à la formation de l'ozone troposphérique par $15,046 \times 10^{-3}$ t COVNM eq, les principaux contribuant dans la formation d'ozone troposphérique sont : le CH₄ par 0,44%, NO_x par 95,54%, CO 1,22% et COVNM par 2,78%. La production de « NPK 15x3s » contribue à l'émission de CO à l'ordre de 75,2%, la

génération d'électricité dans la centrale à charbon par 11,77%, les compresseurs de transport de gaz naturel par 8,29%, la génération d'électricité dans la centrale à gaz naturel par 3,09%, la production de vapeur dans la chaudière à huile 1,4%, et le transport du phosphate de la carrière d'extraction à l'usine de traitement par 1,39. Les COVNM sont générés principalement lors de la production du produit fini « NPK 15x3s » par 90,97%, la génération d'électricité dans la centrale à charbon et la centrale à gaz naturel par 2,88% et 2,63%, par les compresseurs de transport de gaz naturel par 1,65% et lors du raffinage des huiles industriels par 1,21%.

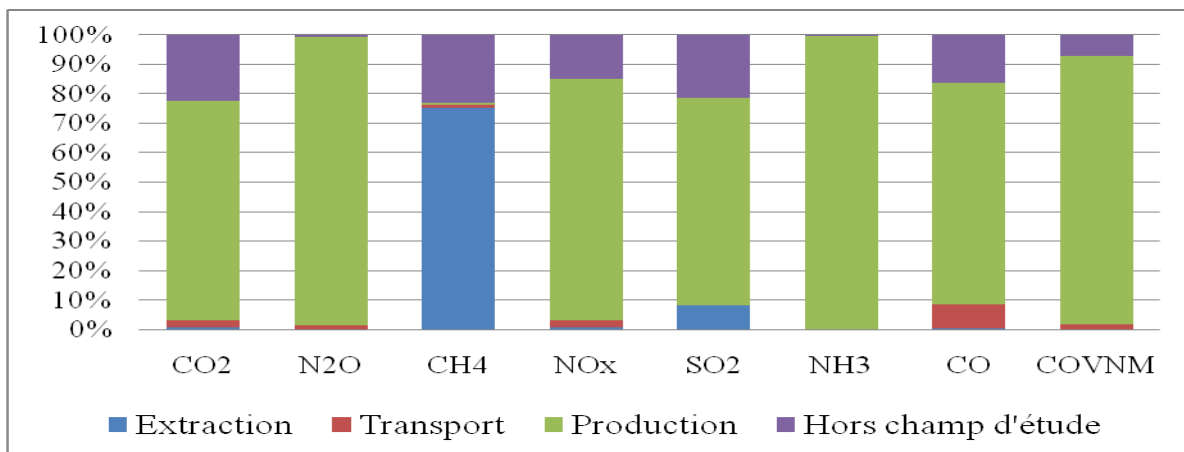


Fig. 51. Contribution des substances dans les différentes phases cycle de NPK 3x15s

2.8.4. Utilisation des ressources

La Demande de Matériau Cumulée (DMC) est de 88,858 t/t de « NPK15x3s », les ressources renouvelables (l'eau et l'air) présentent 98,78% de DMC soit 85,21 t d'eau et 2,564t d'air, les ressources non renouvelables sont caractérisées par l'utilisation de gaz naturel par 0,334 t soit 0,375 %.

La Demande d'Énergie Cumulée (DEC) est de 41,036 GJ/t de « NPK15x3s », les énergies non renouvelables (gaz, pétrole et charbon) présentent 99,968% de DEC, la quantité consommée de gaz naturel est de 37,425 GJ soit 91,2% de DEC totale, la consommation du charbon et de pétrole est de 2,719 GJ et 0,773 GJ respectivement soit 6,625% et 1,883% de DEC totale.

3. Comparaison et discussion des résultats

L'émission des GES est calculée sur la base du facteur d'émission (FE) des combustibles fossiles⁵, Haas and Van Dijk (2010), Kool et (2012) se sont tous référés à ces valeurs pour calculer l'émission des GES en multipliant la quantité des combustibles par ces facteurs (Haas and Van Dijk, 2010 ; Kool et al., 2012). Cette méthode de calcul rend difficile la détermination du niveau de fiabilité des résultats obtenus, et limite leur utilisation dans la comparaison.

Comme il a été précédemment mentionné, le secteur de production des fertilisants a fait l'objet de plusieurs études, mais toutes ces études ont été consacrées à l'évaluation des émissions des GES et la DEC. En outre, les bilans d'entrée utilisés dans ces études sont basés sur des données bibliographiques ou sur des estimations simples (Wood et Cowie, 2004). Pour cette raison, la discussion des résultats de cette étude, va ce limité à la comparaison des émissions des GES et DEC sans faire de comparaison.

3.1. L'ammoniac

3.1.1. Utilisation des ressources

L'unité d'ammoniac objet d'étude, est une unité d'une capacité de production nominale de 1000 t/j. Selon la fiche technique de l'unité (Design), la production d'une tonne d'ammoniac nécessite une consommation de gaz naturel (combustible + procédé) de 1079,3 Nm³. Néanmoins, la moyenne de consommation réelle obtenue dans la présente étude est de 1407,5 Nm³ de gaz naturel, soit un écart de consommation de 30,4%. Cette surconsommation est attribuable d'une part au faible rendement de la réaction catalytique et d'autre part, à la phase de redémarrage de procédé suite aux interruptions de production due aux pannes imprévisibles (dysfonctionnement d'un compresseur, chute de température, etc.)⁶.

⁵ Le facteur d'émission du gaz naturel est de : 56,1 kg CO₂ eq /GJ (Haas and Van Dijk, 2010 ; Kool et al., 2012), le charbon : 96 kg CO₂ eq/GJ, la moyenne du pétrole : 78 kg CO₂ eq/GJ (ADEME, 2007).

⁶ Dans le cas d'une panne, l'unité doit être mise en arrêt pour les opérations de réparations, et après, lors de la phase de redémarrage, l'unité consomme de l'énergie sans fournir de produit, et cela, jusqu'au retour à la phase de production normale (la phase de redémarrage peut aller de 72 h à 96 h dans les meilleurs cas).

Le tableau 30 ci-dessous montre une comparaison entre la consommation réelle du gaz naturel dans l'unité et le design :

Tableau 30. Comparaison entre la consommation réelle du gaz naturel et le design dans l'unité d'ammoniac.

Cons. de gaz naturel	Design Nm ³	Design GJ	Réelle Nm ³	Réel GJ	Écart (%)
Procédé	616,51	20,39	797,8	26,39	29,4
Combustible	462,79	15,3	609,7	20,16	31,7
Total	1079,3	35,7	1407,5	46,56	30,4

Le tableau 31 ci-dessous montre les résultats de la DEC pour la production d'une tonne d'ammoniac dans des études précédentes. Il y a une grande différence dans la demande d'énergie avec une valeur inférieure de 27,6 GJ/t d'ammoniac pour les unités modernes construits selon les MTD, et une valeur supérieure de 50 GJ/t pour les unités les moins efficaces (Lako, 2009; Williams and Al-Ansari, 2007). IEA, 2007 se réfère à une moyenne européenne qui varie entre 34,7 et 35 GJ/t, et donne une moyenne mondiale de 41,5 GJ/t, avec une portion de 70% pour l'ammoniac produit dans les unités qui fonctionnent à base de gaz naturel, 21% à base de charbon, et 8% à base de pétrole (IEA, 2007). En raison du PCI bas du charbon et du pétrole, la demande d'énergie dans les unités de production d'ammoniac à base de charbon ou du pétrole est plus importante (Kool et al., 2012).

Tableau 31. Consommation d'énergie pour la production d'ammoniac (Kool et al., 2012)

Région	Valeur	Unité	Référence
Moyenne mondiale	41,5	GJ/t d'ammoniac	Williams and Al-Ansari, 2007
Europe	35,0		Haas and Van Dijk, 2010
Russie + Europe centrale	40,7		IEA, 2007
Amérique du nord	37,9		
La Chine et l'Inde	47,6		
Reste du monde	36,4		

3.1.2. L'émission des GES

Wood et Cowie (2004) ont déterminé une moyenne européenne de 1,91 t CO₂ eq/t d'ammoniac. Haas and Van Dijk (2010) se réfèrent à une moyenne européenne de 1,95 t CO₂ eq/t, et Williams & Al-Ansari (2007) à une moyenne mondiale de 2,07 t CO₂ eq/t. Williams and Al-Ansari (2007) explique cette augmentation par l'inclusion des émissions supplémentaires pour la production et le transport des matières premières. En plus, les

résultats se distinguent d'une région à l'autre ; cela revient à l'utilisation de différents mélanges de combustibles fossiles, et à la différence entre les niveaux d'efficacité des usines de production étudiées (Kool et al., 2012).

Le tableau 32 ci-dessous montre l'émission des GES pour la production d'un tonne d'ammoniac dans certaines études précédentes. Dans cette étude, lors du calcul de bilan d'émission des GES, seule la quantité de gaz naturel utilisée comme combustible a été considérée, le reste (gaz de procédé) n'a pas été prise en compte.

Tableau 32. Émission des GES pour la production d'une tonne d'ammoniac (Wood and Cowie, 2004; Kool et al, 2012)

Région	Valeur	Unité	Référence
Pays-Bas	2,16		Kramer, 1996
Moyenne européenne	1,91		Kongshaug, 1998
Europe technologie moderne	1,66		
Canada	1,60	T CO ₂ eq/t	IPCC, 1996
USA (usine d'ammoniac)	1,26	d'ammoniac	EPA, 1993
Australie	1,25-1,8		EFMA, 2000
Moyenne mondiale	2,07		Williams and Al-Ansari, 2010
Europe	1,95		Haas and Van Dijk, 2010

3.2. Acide nitrique

3.2.1. L'émission des GES pour l'acide nitrique

Le procédé de production d'acide nitrique est caractérisé par l'émission de N₂O, le tableau 33 ci-dessous montre les données d'émission de N₂O dans les procédés des différentes régions du monde. Selon Kongshaug (1998), la moyenne européenne de l'émission de N₂O dans les unités de production d'acide nitrique est de 6,7kg N₂O/t. IEA 2007, a donné une moyenne d'émission pour les États-Unis de 9 kg N₂O/t. En 2006, l'IPCC a donné une moyenne mondiale qui varie entre 5 kg N₂O pour les usines qui fonctionnent selon un procédé de basse pression et 9 kg pour celles qui fonctionnent à haute pression.

Avec l'utilisation des technologies de réduction, l'émission de N₂O peut être remarquablement réduite (Kool et al, 2012). Les MTD des émissions de N₂O est d'environ 1,85 kg/t seulement (Haas & Van Dijk, 2010). Une étude de groupe a fixé une moyenne d'émission de 7 kg N₂O/t HNO₃ avec un minimum de 0,01 et un maximum de 21,6 kg (Kool

et al, 2012).

Tableau 33. Émission de N₂O de la production d'acide nitrique (Kool et al, 2012)

Région	Valeur	Unité	Référence
Monde	HP	5	IPCC, 2006
	MP	7	
	BP	9	
Pays en développement	8,9	kg N ₂ O/t HNO ₃	EPA, 2010
	4,6		Haas and Van Dijk, 2010
Europe	7		Zwiers et al., 2009
	6,7		Kongshaug, 1998
États-Unis	9		IEA, 2007

3.3. Calcium Ammonium Nitrate

3.3.1. Utilisation des ressources

Selon Kool et al (2012), la production d'une tonne de CAN nécessite 756 kg de nitrate d'ammonium et 244 kg de dolomite. Dans la présente étude, la production d'une tonne de CAN nécessite 871kg de nitrate d'ammonium et 208 kg de dolomite.

3.3.1. L'émission des GES

Dans son étude, Kongshaug (1998) a déterminé une moyenne d'émission des GES de 1,85 CO₂ eq/t de CAN. EFMA (2008), se réfère à une moyenne de 1,68 t CO₂ eq. Kool et al (2012) a calculé l'empreinte carbone pour plusieurs fertilisants azotés, l'essentiel des résultats est montré dans le tableau 34 ci-dessous :

Tableau 34. L'émission des GES pour la production d'une tonne de CAN (kool et al., 2012)

Région	Valeur	Unité
Moyenne mondiale	2,567	CO ₂ eq/ t CAN
Europe occidentale	2,208	
Russie et Europe centrale	2,565	
Amérique du nord	2,285	
Chine et Inde	3,261	
Reste du monde	2,249	

3.4. TSP et SSP

3.4.1. Utilisation des ressources

Dans son travail, Kongshaug (1998) a expliqué que la majorité du TSP et SSP sont produits selon un processus basé sur le broyage du phosphate en poudre et la granulation de la poudre, avec une consommation totale d'énergie pour la production du TSP de 2 GJ/t de TSP à 48%, dont 0,7 GJ est utilisé pour la production de la vapeur ; 0,3 GJ pour le broyage, et 1 GJ pour la granulation. La consommation totale d'énergie pour la production d'une tonne de SSP est de 1,4 GJ, dont 0,4 GJ pour la production de poudre et 1 GJ pour la granulation. Kool et al (2012) se sont référés aux mêmes valeurs.

Selon les résultats de cette étude, la production des fertilisants phosphatés consomme une quantité totale de 13,18 GJ/t de TSP dont 1,25 GJ est pour la granulation, et 1,46 GJ/t de SSP dont 0,94 GJ est pour à la granulation. Les processus amont dans le cycle de vie du TSP sont responsables de 90,48% de consommation d'énergie, et dans le cycle de vie du SSP de 34,93%.

3.4.2. L'émission des GES

Kool et al (2012) ont donné les résultats pour l'émission des GES relatifs à la production de SSP et de TSP (Tableau 35). Mais, Wood et Cowie (2004), expliquent qu'aucune émission de GES liée à la phase de production de soufre n'est attribuée au bilan total dans la totalité des études.

Tableau 35. Émission des GES pour la production d'une tonne de TSP et SSP (Kool et al, 2012)

Région	TSP	SSP	Unité	Références
Moyenne mondiale	0,21	0,035		
Europe occidentale	0,09	0,020		
Russie et Europe centrale	0,21	0,035		
Amérique du nord	0,17	0,028		Kool et al., 2012
Chine et Inde	0,28	0,046	CO ₂ eq/t	
Reste du monde	0,17	0,028		
	0,35	-		EFMA, 2008
Europe occidentale	0,17	0,020		Kongshaug, 1998
	0,52	0,220		Davis & Haglund, 1999

3.5. NPKs et NPKch

3.5.1. Utilisation des ressources

Kongshaug (1998) a donné des moyennes européennes de DEC pour la production des fertilisants NPK qui varie entre 6,5 GJ/t et 9,3 GJ/t. L'auteur n'a pas donné de détail sur les sources de ces valeurs. Selon les résultats de la présente étude, le NPKs demande 0,868 GJ/t, le NPKch 0,821GJ/t, ces résultats sont relatives à la phase de production, le reste de DEC est lié au processus amont.

3.5.2. Émission des GES

Kongshaug (1998), a donné des valeurs d'émission des GES relatives à la production de différentes formes NPK comprises entre 0,34 t CO₂ eq/t NPK mixte et 0,97 t CO₂ eq/t NPK acide dans les technologies actuelles, et entre 0,06 et 0,41 t CO₂ eq/t pour les nouvelles technologies (Wood et Cowie, 2004). Kongshaug n'a pas inclus les émissions relatives à la phase de transport (Wood et Cowie, 2004). Kool et al (2012) a exprimé ces deux mêmes types de fertilisants, par NPK (à base de NA+PA+KCl) et NPK (à base de Urée+TSP+KCl) (Tableau 36).

Les deux produits NPK étudiés dans la présente étude sont, le NPKch (à base de KCl+NH₃+H₃PO₄), et NPKs (à base de K₂SO₄+NH₃+H₃PO₄).

Tableau 36. Émission des GES pour la production de NPK (Kool et al, 2012)

Région	NPK	NPK	Unité	Références
Moyenne mondiale	1,368	0,928		
Europe occidentale	1,120	0,667		
Russie et Europe centrale	1,338	0,897		
Amérique du nord	1,162	0,706	CO ₂ eq/t	Kool et al., 2012
Chine et Inde	1,762	1,347		
Reste du monde	1,143	0,688		
Europe occidentale	0,384	0,100		Kongshaug, 1998

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'industrie des fertilisants occupe une place importante dans le développement des économies locales grâce à son rôle essentiel comme producteur des éléments de base pour le développement du secteur agricole. Ce travail donne une vue d'ensemble sur la question environnementale dans le secteur de production des fertilisants. Il a été réalisé pour enrichir les connaissances théoriques et pratiques sur l'évaluation des impacts environnementaux de secteur. Une connaissance sur la nature et les quantités des matières premières utilisées et des substances émises dans l'environnement par l'industrie des fertilisants en Algérie.

La nécessité d'utiliser un outil d'évaluation environnementale crédible et surtout capable de prendre en compte l'ensemble des procédés de production utilisés par le secteur semble indispensable. L'emploi de l'Analyse de Cycle de Vie est la méthode la mieux indiquée du moment pour un tel objectif. Sa vision globale, elle permet de réaliser une analyse des entrées et des sorties d'un procédé de production, de prendre en compte les données d'entrées des procédés amont et d'ajouter l'impact lié à ses procédés lors de l'évaluation d'impact.

L'application de l'ACV sur la production des fertilisants et des produits chimiques « Fertial-Annaba » atteste l'utilisation de procédés de production classiques, avec une grande consommation des matières premières. Ce qui se traduit par une surconsommation des énergies non renouvelables (gaz naturel) principale combustible pour le séchage des produits finis, la production de vapeur HP, ou comme matière première pour la production de l'ammoniac.

À l'issue de cette étude, il ressort que la production des fertilisants consomme d'importantes quantités d'énergie fossiles et génère par conséquent des GES. Le Sulfazot semble être le fertilisant qui a plus d'impact sur l'environnement. La production d'une tonne de Sulfazot génère 8,64 t CO₂ eq de GES dont le N₂O présente 59,44%.

L'unité d'ammoniac compte pour 75% dans la production totale de Fertial-Annaba, et consomme 78% du gaz naturel de l'entreprise. L'ammoniac est donc le principal produit de l'entreprise. La production d'une tonne d'ammoniac contribue principalement au

réchauffement climatique par l'émission d'environ 1,44t CO₂ eq des GES, et à l'épuisement des ressources par la consommation de 51,94 GJ de gaz naturel, ce dernier est supérieur de 25,16% à la moyenne mondiale qui est de 41,5 GJ/t d'ammoniac. A la lumière de ces résultats, on peut considérer que l'unité d'ammoniac est la principale source d'impact sur l'environnement en matière d'émission des GES et d'utilisation des ressources naturelles.

Les raisons de cette surconsommation d'énergie résident dans deux facteurs, le premier est lié à la vétusté des installations depuis 1982, ce qui contraint l'unité à effectuer redémarrages suite aux pannes fréquentes. Un deuxième facteur est lié aux opérations de reformage du gaz, des opérations qui contribuent principalement à l'épuisement des ressources naturelles d'un côté et à l'émission des GES de l'autre côté. Ceci peut être dû à la faible efficacité de la réaction catalytique, dans laquelle les catalyseurs sont utilisés pendant plus de 10 ans.

La mise à niveau des équipements industriels et leur maintien régulier et le remplacement des catalyseurs dans les unités de production (particulièrement dans l'unité d'ammoniac et d'acide nitrique) sont deux maillons de la chaîne du cycle qui assureront un meilleur rendement des unités de production et contribuer à la réduction de la consommation de gaz naturel et en conséquence la réduction de l'émission des GES.

L'administration de FERTIAL-Annaba et dans le cadre de la réalisation de ses engagements et de ses objectifs de renouvellement des équipements, la mise à niveau des installations, et la rénovation des unités de production, a procédé au remplacement régulier des catalyseurs (chaque trois ans), une action qui doit augmenter le rendement des unités, réduire leur demande en énergie et aussi minimiser l'écart entre le design et la réalité. C'est une action encourageante pas pour son intérêt économique indiscutable, mais pour l'impact positif sur l'environnement. Cette action fera l'objet d'une étude ultérieure où l'influence de la réaction catalytique sur l'efficacité énergétique des unités de production des fertilisants.

Références bibliographiques

- Abu-Eishah SI, Bani-Kananeh AA, Allawzi MA. K_2SO_4 production via the double decomposition reaction of KCl and phosphogypsum. *Chemical Engineering Journal*. 2000; 76: 197-207.
- ADEME (French Agency for Environment, Energy Management). Guide of emission factors. Version 5.0. Calculation of emission factors and bibliographical sources used; 2007. p. 240.
- Ahlgren S, Baky A, Bernesson S, Nordberg A, Norén O, Hansson PA. Ammonium nitrate fertiliser production based on biomass – Environmental effects from a life cycle perspective. *Bioresource Technology*. 2008; 99: 8034-8014.
- Ammari T.G, Tahhan R, Abubaker S, Al-zubi Y, Tahboub A, Taany R, Abu-Romman S, Al-Manaseer N, Stieiya M.H. Soil Salinity Changes in the Jordan Valley Potentially Threaten Sustainable Irrigated Agriculture. *Pedosphere*. 2013; 23(3): 376-384.
- Anderson K, Bows A, Mander S. From long-term targets to cumulative emission pathways: reframing UK climate policy. *Energy Policy*. 2008; 36(10): 3714-3722.
- Andrae A.S.G. Global Life Cycle Impact Assessments of Material Shifts: The Example of a Lead-free Electronics Industry. Springer Science & Business Media. P 205. ISBN: 978-1-84882-661-8.
- Artigas A. "Amérique du Sud: les Démocraties Inachevées", Armand Colin, Paris, 2005.
- Azapagic A. Life cycle assessment and its application to process selection, design and optimisation. *Chemical Engineering Journal*. 1999; 73: 1-21.
- Barros R, Isidoro D, Aragiüés R. Irrigation management, nitrogen fertilization and nitrogen losses in the return flows of La Violada irrigation district (Spain). *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2012; 155(15): 161-171.
- Basse-Mens, C. « Propositions pour une adaptation d'Analyse de Cycle de Vie aux systèmes de production agricole - mise en œuvre pour l'évaluation environnementale de la production porcine ». 2005. Thèse de Doctorat. Institut Nationale de la Recherche Agronomique (INRA) Rennes. France.
- Belem G, Revéret J.P, gendron C. L'Analyse du Cycle de Vie comme outil de développement durable. 2005. Ecole des sciences de la gestion, Université du Québec à Montréal, Canada. Pp 65. ISBN : 2-923324-29-3
- Benoît-Norris C, Vickery-Niederman G, Valdivia S, Franze J, Traverso M, Ciroth A, Mazijn B. Introducing the UNEP/SETAC methodological sheets for subcategories of social LCA. *International Journal of Life Cycle Assessment*. 2011; 16 (7): 682-690.
- Benoist A. Adapting life-cycle assessment to Biofuels: some elements from the first generation case. 2009.
- Benouaret N. Algeria presents 0.4% of global market of ammonia, El-watan, Algeria. On line at: http://www.elwatan.com/supplement-economie/produitsmarches/l-algerie-represente-0-4-du-marche-mondial-de-l-ammoniac-14-02-2011-111702_201.php, 2011.
- Bicalho, T. « Les limites de l'ACV étude de la soutenabilité d'un biodiesel issu d'huile de palme

- brésilienne* ». 2013. Thèse de doctorat. Université Paris-Dauphine. Paris. France.
- Bonnard N, Jargot D, Nikolova-Pavageau N, Miraval S, Schneider O. Fiche Toxicologique, Acide Phosphorique. 2011. Institut Nationale de Recherche et de Santé (INRS).
- Boulaine J. Histoire de la fertilisation phosphatée 1762-1914. *Étude et Gestion des Sols* 2006; 13 (2) : 129 -137.
- Boussen, R. « *Valorisation de l'acide phosphorique par précipitation du cadmium et pertraction de l'uranium* ». 2007. Thèse de doctorat. Université Mohammed V – Agdal. Rabat. Maroc. N° d'ordre: 2352. 11-07-2007.
- Boustead I, Hancock G.F. *Handbook of Industrial Energy Analysis*. 1979. Ellis Horwood Ltd, Publisher.
- Boves H, Church. *Food Values*. 2nd edition. 1970. Philadelphia, Toronto, Lippincott Company.
- Brentrup F, Küsters J, Lammel J, Barraclough P, Kuhlmann H. Environmental impact assessment of agricultural production systems using the life cycle assessment (LCA) methodology II. The application to N fertilizer use in winter wheat production systems. *European Journal of Agronomy*. 2004; 20 (3): 265-279.
- Casenave, H. « *Intérêt de l'administration orale de potassium pour le traitement de l'hypokaliémie chez les bovins* ». 2005. Thèse de doctorat. Université Paul-Sabatier de Toulouse. France. Référence : 2005 – TOU 3 – 4054.
- Castillon P, Massé J. Richesse du sol : une notion relative. Dans « Fertilisation P-K : raisonner pour agir ». 2005. ARVALIS Institut du Végétal, p. 10-11
- Chabane M. Heurs et malheurs du secteur agricole en Algérie : 1962-2012. 2013. Paris (France) : L'Harmattan. 315 p. (Histoire et Perspectives Méditerranéennes). ISBN : 978-2-336-29051-5.
- CML, Environmental Sciences Institute (CML). 2007. [On line at: <http://www.coprocessing.info/glossary/cml-method.htm>].
- CSST, Commission de la Santé et de la Sécurité de Travail (CSST). Répertoire toxicologique. 2006. On line at: <http://www.csst.qc.ca/prevention/reptox/pages/repertoire-toxicologique.aspx>
- Cooper JS. Specifying functional units and reference flows for comparable alternatives. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 2003; 8(6): 337–49.
- CORRIM, Consortium For Research On Renewable Industrial Materials (CORRIM). Research guidelines for life cycle inventories. On file University of Washington, Seattle, WA. 2001. [47 pp.].
- Coulon R, Camobreco V, Teulon H, Besnainou J. Data quality and uncertainty in LCI. *International Journal of Life Cycle Assessment*. 1997; 2 (3):178–182.
- Crettaz P, Jolliet O, Saadé M, Shaked Sh. Analyse de cycle de vie - comprendre et réaliser un écobilan (2^{ème} édition). 2010. Presses polytechniques et universitaires romandes. ISBN: 978-2-88074-886-9
- Dale M, Krumdieck S, Bodger P. Net energy yield from production of conventional oil. *Energy Policy*. 2011; 39 (11): 7095-7102.

- Daujot A, Éveillard Ph, Hebert J, Ignazi JC, « ENGRAIS », *Encyclopædia Universalis*, On line at : <http://www.universalis.fr/encyclopedie/engrais/>
- Davis J, Haglund C. Life Cycle Inventory (LCI) of Fertiliser Production. Fertiliser Products Used in Sweden and Western Europe. 1999. Master's Thesis, Chalmers University of Technology. SIK-Report No. 654.
- DE Laverne L. L'Agriculture en France et le Libre-échange. *Revue des Deux Mondes*. 1896 : 2 (3) : 92-122
- De Morais RF, Boddey RM, Urquiaga S, Jantalia CP, Alves BJR. Ammonia volatilization and nitrous oxide emissions during soil preparation and N fertilization of elephant grass (*Pennisetum purpureum* Schum.). *Soil Biol Biochem*. 2013; 64: 80–8.
- DOE, US Department of Energy (DOE). Agricultural Chemicals: Fertilisers. 2000. Chapter 5 in Energy and Environmental Profile of the U.S. Chemical Industry.
- EEA, European Environment Agency (EEA). 1997. Life Cycle Assessment (LCA): A guide to approaches, experiences and information sources. Pp 116
- Eco-indicator 99. A damage oriented method for life cycle impact assessment. 2000. [On line at: <http://www.pre-sustainability.com/eco-indicator-99-manuals>].
- Econostrum, 2014. Algérie - Espoirs pour la filière engrais après la levée du «dos d'âne » européen. On line at : http://www.econostrum.info/Algerie-Espoirs-pour-la-filiere-engrais-apres-la-levee-du-dos-d-ane-europeen_a9044.html
- EDIP. Environmental Design of Industrial Products (EDIP). 1999. [On line at: http://orbit.dtu.dk/fedora/objects/orbit:58714/datastreams/file_4646274/content].
- EFMA, European Fertilizer Manufacturers Association (EFMA). Best Available Techniques for Pollution Prevention and Control in the European Fertilizer Industry. Production of ammonia, Booklet No. 1. 2000a, Brussels, Belgium.
- EFMA, European Fertilizer Manufacturers Association (EFMA). Best Available Techniques for Pollution Prevention and Control in the European Fertilizer Industry. Production of Nitric Acid, Booklet No. 2. 2000b, Brussels, Belgium.
- EFMA, European Fertilizer Manufacturers Association (EFMA). Best Available Techniques for Pollution Prevention and Control in the European Fertilizer Industry. Production of Urea and Urea Ammonium Nitrate (UAN), Booklet No. 5. 2000c, Brussels, Belgium.
- EFMA, European Fertilizer Manufacturers Association (EFMA). Best Available Techniques for Pollution Prevention and Control in the European Fertilizer Industry. Production of Ammonium Nitrate and Calcium Ammonium Nitrate, Booklet No. 6. 2000d, Brussels, Belgium.
- EFMA, European Fertilizer Manufacturers' Association (EFMA). Reference Document on Best Available Techniques for the manufacture of Large Volume Inorganic Chemicals Ammonia, Acids and Fertilisers. 2007. B-1160 Brussels, Belgium: Ave. E van Nieuwenhuysse 4.
- Ekvall T, Tillman A.M, Molander S. Normative ethics and methodology for life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*. 2005; 13 (13-14): 1225-1234.
- EPA (US Environmental Protection Agency). Synthetic Ammonia, AP-42. 5th ed. vol. 1. Chapter 8:

- Inorganic chemical industry; 1993.
- EPS 2000. Impact Assessment Method. Environmental Priority Strategies in product design (EPS) 2000. [On line at: <http://www.earthshift.com/software/simapro/eps2000>].
- ESU-Service, 2014 [On line at: <http://www.esu-services.ch/fr/banque-de-donnees/ecoinvent/>].
- FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Utilisation des engrais par culture en Algérie. 2005. Service de la gestion des terres et de la nutrition des plantes, Division de la mise en valeur des terres et des eaux. Pp 61.
- FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2012. Utilisation des phosphates naturels pour une agriculture durable. On line at : <http://www.fao.org/docrep/007/y5053f/y5053f05.htm>
- Fardeau JC. Dynamique du phosphore et du potassium dans le système sol-plante. Dans « Fertilisation P-K : raisonner pour agir ». ARVALIS Institut du Végétal. 2005. p 12- 19
- Faust M. Physiology of Temperate Zone Fruit Trees, J. 1989. Wiley and Sons Inc., USA.
- Faust M. Physiology of Temperate Zone Fruit Trees. 1989. J. Wiley and Sons Inc., USA.
- FERTIAL, 2012. La fertilisation des céréales et la sécurité alimentaire, Fertial news, N° 25, On line at : http://www.fertial-dz.com/pdf/fertial_news_n_25.pdf
- FERTIAL. 2014. Le réseau de distribution. Online at: http://www.fertial-dz.com/res_soc.html
- Finnveden G, Michael Z, Hauschild M, Ekvall T, Guinée J, Heijungs R, et al. Recent developments in life cycle assessment. J Environ Manag 2009;91(1):01–21.
- Gilbert P, Alexander S, Thornley P, Brammer J. Assessing economically viable carbon reductions for the production of ammonia from biomass gasification. Journal of Cleaner Production. 2014. 64: 581-589.
- Gilbert P, Thornley P. Energy and carbon balance of ammonia production from biomass gasification, Bio-ten., Holiday Inn, Birmingham, Sep 21–23, 2010. On line at: <https://www.escholar.manchester.ac.uk/api/datastream?publicationPid=ukacmanscw:91274&datastreamId=FULL-TEXT.PDF>, 2010.
- Goedkoop M, Oele M. Introduction to LCA with SimaPro 7. 2008. Pre Consultant, Amersfoort.
- Guichon-Vannes. Engrais phosphatés – Process de fabrication des Engrais phosphatés. 2014. <http://guichon-vannes.com/faqs/engrais-phosphates-process-de-fabrication-des-engrais-phosphates/>
- Guinée J.B, Gorrée M, Heijungs R, Huppes G, Kleijn R, De Koning A, Van Oers L, Wegener Sleswijk A, Suh S, Udo de Haes H.A, De Bruijn H, Van Duin R, Huijbregtsn MAJ. Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards. I: LCA in perspective. IIa: Guide. IIb: Operational annex. III: Scientific background. 2002. Kluwer Academic Publishers ISBN 1-4020-0228-9
- Guinée J.B, Heijungs R. A proposal for the classification of toxic substances within the framework of life cycle assessment of products. Chemosphere 1993; 26 (10): 1925-1944.
- Guinée J.B, Udo de Haes H.A, Huppes G. Quantitative life cycle assessment of products:1. Goal

- definition and inventory. *Journal of Cleaner Production*. 1993: 1 (1): 3-13.
- Gupta D.K, Chatterjee S, Datta V, Walther C. Role of phosphate fertilizers in heavy metal uptake and detoxification of toxic metals. *Chemosphere*. 2014: 108: 134-144.
- Haas MJGde, van Dijk TA. Inventarisatie klimaatvriendelijke kunstmest. Wageningen: Nutriënten Management Instituut NMI; 2010.
- Hajjaji, N. « *Analyse de cycle de vie éxergétique de systèmes de production d'Hydrogène* ». 2011. Thèse de doctorat. Institut nationale polytechnique de Lorraine. France.
- Harscoet, E. « *Développement d'une comptabilité environnementale orientée vers la création de valeur* ». 2007. Thèse de Doctorat. Ecole supérieure des arts et des métiers. Paris-Tech. France.
- Harrison RM. Pollution: causes, effects and control. 4th ed. Cambridge, Great Britain: Royal Society of Chemistry; 2001.
- Hauschild M, Potting J. Spatial Differentiation in Life Cycle Impact Assessment - The EDIP 2003 Methodology. 2003. Institute for Product Development Technical University of Denmark.
- Heijungs R, Guinée J.B, Huppes, G, Lankreijer R.M, Udo de Haes H.A, Wegener Sleeswijk A, Ansems A.M.M, Eggels P.G, Van Duin R. de Goede H.P. Environmental Life Cycle Assessment of products. Guide-October 1992. NOH report 9266 Leiden: Centre of Environmental Science, Pp 96. ISBN: 90-5191-064-9.
- Historique des engrais, 2013. On line at : <http://admi.s-v.perso.sfr.fr/articles.php?lng=fr&pg=137>
- IEA, International Energy Agency (IEA). 2007. Tracking industrial energy efficiency and CO₂ emissions. p. 324.
- IFA, International Fertilizer Industry Association (IFA). Statistical information on fertilizer use from International Fertilizer Association: 2006.
- IFA. International Fertilizer Industry Association (IFA). Sustainable Management of the Nitrogen Cycle in Agriculture and Mitigation of Reactive Nitrogen Side Effects. 2007.
- IFA, International Fertilizer Industry Association (IFA). Fertilizers, Climate Change and Enhancing Agricultural Productivity Sustainably: 2009.
- IFA, International Fertilizer Industry Association (IFA). 2011. Heffer P, Prud'homme M. Fertilizer Outlook 2011 – 2015. 79th IFA Annual Conference Montreal (Canada), 23-25 May 2011.
- IFA, International Fertilizer Industry Association (IFA). Production and international trade committee. world pa statistics by country in '000 tonnes product. 2014a. Phosphoric Acid public.
- IFA, International Fertilizer Industry Association (IFA). Production and international trade committee. world pa statistics by country in '000 tonnes product. 2014b. Triple Superphosphate.
- IFA, International Fertilizer Industry Association (IFA). Production and international trade committee. world pa statistics by country in '000 tonnes product. potash public. 2014c. On line at: http://www.fertilizer.org/en/doc_library/Statistics/PIT/Potash_public.xlsx
- IFDC, International Fertilizer Development Center (IFDC). 1998. United Nations industrial development (UNIDO). Fertilizer manual. ISBN 0-7923-5011-1.
- International Standard Organization (ISO) 14041. Environmental management—life cycle assessment:

- Goal and scope definition. Geneva: International Organization for Standardization; 1998.
- International Standard Organization (ISO) 14041. Environmental management—life cycle assessment: Inventory analysis. Geneva: International Organization for Standardization; 1999.
- International Standard Organization (ISO) 14042. Environmental management—life cycle assessment: Life cycle impact assessment. Geneva: International Organization for Standardization; 2000a.
- International Standard Organization (ISO) 14043. Environmental management—life cycle assessment: Life cycle interpretation. Geneva: International Organization for Standardization; 2000b.
- International Standard Organization (ISO) 14040. Environmental management—life cycle assessment: principles and framework. Geneva: International Organization for Standardization; 2006a.
- International Standard Organization (ISO) 14044. Environmental management—life cycle assessment: requirements and guidelines. Geneva: International Organization for Standardization; 2006b.
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Revised IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Reference Manual; 1996. London, U.K.
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories: N₂O Emissions from Adipic Acid and Nitric Acid Production. 2000. London, U.K.
- IPPC, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Reference Document on Best Available Techniques for the Manufacture of Large Volume Inorganic Chemicals – Ammonia, Acids and Fertilisers. 2007. BREF 08.07. Integrated Pollution Prevention and Control, under the European Commission.
- IPI, International Potash Institute. (IPI). Le Potassium, Un élément essentiel à la vie. 2012. On line at : <http://www.ipipotash.org/udocs/408-k-essentiel-fr.pdf>
- IPNI, International Plant Nutrition Institute, (IPNI). Nutrient Source Specifics, Diammonium Phosphate (DAP). Ref. #17- 11040. 2014a. On line at : [http://www.ipni.net/ipniweb/portal.nsf/0/16F0F8D2C7BA69CD852572A0004FAD58/\\$FILE/2014%20IPNI%20catalog%20for%20print.pdf](http://www.ipni.net/ipniweb/portal.nsf/0/16F0F8D2C7BA69CD852572A0004FAD58/$FILE/2014%20IPNI%20catalog%20for%20print.pdf)
- IPNI, International Plant Nutrition Institute, (IPNI). Nutrient Source Specifics, Monoammonium Phosphate (MAP). Ref. #10069. 2014b. On line at : [http://www.ipni.net/publication/nss.nsf/0/2F200FA9C8C946F0852579AF00762904/\\$FILE/NS_S-09%20Monoammonium%20Phosphate.pdf](http://www.ipni.net/publication/nss.nsf/0/2F200FA9C8C946F0852579AF00762904/$FILE/NS_S-09%20Monoammonium%20Phosphate.pdf)
- IPNI, International Plant Nutrition Institute, (IPNI). Production and use of potassium, Better crop.2014c. On line at: [https://www.ipni.net/ppiweb/bcrops.nsf/\\$webindex/02FB2A65B5DE395D852568F000674947/\\$file/98-3p06.pdf](https://www.ipni.net/ppiweb/bcrops.nsf/$webindex/02FB2A65B5DE395D852568F000674947/$file/98-3p06.pdf)
- IPPC, Integrated Pollution Prevention and Control Reference (IPPC). Document on Best Available Techniques for the Manufacture of Large Volume Inorganic Chemicals - Ammonia, Acids and Fertilisers. 2007. European Commission.
- IRIS, Integrated Risk Information System (IRIS). Database, Phosphoric Acid. 2005. On line at : <http://www.epa.gov/iris/subst/0697.htm>

- Isherwood K.F. Fertilizer use in western Europe: types and amounts. 2012. Agricultural sciences. Vol II. Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS) <http://www.eolss.net/Eolss-sampleAllChapter.aspx>
- James Laylin W. A. E. *1918 Nobel Laureate. Fritz Haber 1868-1934, Nobel Laureates in Chemistry, 1901-1902*, États-Unis, American Chemical Society et Chemical Heritage Foundation, 1993 (ISBN 0-8412-2690-3), p. 118
- Jeanneret P, Baumgartner D.U, Knuchel R.F, Koch B, Gaillard G. An expert system for integrating biodiversity into agricultural life-cycle assessment. *Ecological Indicators*. 2014; 46: 224-231.
- Jenssen T, Kongshaug G. Energy consumption and greenhouse gas emissions in fertiliser production. 2000. Proceedings No. 509. International Fertiliser Society, York, UK.
- Jie Z, Songze W, Shenglei F, Xiaoli W, Min W, Chenfei L, Yuanqi C, Xiaolin Z. Effects of understory removal and nitrogen fertilization on soil microbial communities in Eucalyptus plantations. *Forest Ecology and Management*. 2013; 310 (15): 80-86.
- Jolliet O, Margni M, Charles R, Humbert S, Payet J, Rebitzer G, Rosenbaum R. IMPACT 2002+: A new life cycle impact assessment methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 2003; 8 (6): 324-330.
- Jury C, Benetto E, Koster D, Schmitt B, Welfring J. Life Cycle Assessment of biogas production by monofermentation of energy crops and injection into the natural gas grid. *Biomass & Bioenergy*. 2010; 34: 54-66.
- Kahrl F, Yunju L, Yufang S, Tennigkeit T, Wilkes A, Jianchu X. Greenhouse gas emissions from nitrogen fertilizer use in China. *Environmental science & policy*. 2010; 13: 688-694.
- Kennedy D.J, Montgomery D.C, Quay B.H. Data quality - stochastic environmental life cycle assessment modeling. *International Journal of life cycle assessment*. 1996;1(4):199-207.
- Klüppel H.J. The Revision of ISO Standards 14040–3. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 2002; 10 (3): 165.
- Kongshaug G. Energy consumption and greenhouse gas emissions in fertilizer production. Proceedings on IFA Technical Conference, Marrakech, Morocco, 28 September-1 October; 1998. Pp 18.
- Kool A, Marinussen M, Blonk H. LCI data for the calculation tool Feed print for greenhouse gas emissions of feed production and utilization. GHG Emissions of N, P and K fertilizer production. Gravin Beatrixstraat 34, 2805 PJ Gouda, Netherlands: Blonk Consultants; 2012.
- Kramer KJ, Moll HC, Nonhebel S. Total Greenhouse Gas Emissions Related to the Dutch Crop Production System. *Agric Ecosyst Environ* 1999;1(72):9–16.
- Krozer J, Vis J. How to get LCA in the right direction?. *Journal of Cleaner Production*. 1991; 6: 53-61.
- Lako P. Energy conservation potential of the nitrogen fertiliser industry. Rapport ECN-E- 09-11; 2009. p. 42.
- Laribi K. Analyse de Cycle de Vie appliquée à une laiterie (Cas de la Laiterie Fromagerie de Boudouaou). 2012. Mémoire de Magistère. Université M'hamed Bougara Boumerdes. Algérie.

- Larousse française, Dictionnaire de la langue française. 2014a. On line at: <http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/fertilisant/33395>
- Larousse française, Dictionnaire de la langue française. 2014b. On line at: <http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/engrais/29570?q=engrais#29456>
- Leroy, Y. « Développement d'une méthodologie de fiabilisation des prises de décisions environnementales dans le cadre d'analyses de cycle de vie basée sur l'analyse et la gestion des incertitudes sur les données d'inventaires ». 2009. Thèse de Doctorat. Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Paris. France.
- Lewandowska A, Matuszak-Flejszman A, Joachimiak K, Ciroth A. Environmental life cycle assessment (LCA) as a tool for identification and assessment of environmental aspects in environmental management systems (EMS). *International Journal of Life Cycle Assessment*. 2011: 16 (3): 247-257.
- Lewandowska A, Kurczewski P, Kulczycka J, Joachimiak K, Matuszak-Flejszman A, Baumann H. LCA as an element in environmental management systems-comparison of conditions in selected organizations in Poland, Sweden and Germany. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 2013: 18(2): 472-480.
- Ligthart T.N, Jongbloed R.H, Tamis J.E. A method for improving Centre for Environmental Studies (CML) characterization factors for metal: (eco) toxicity — the case of zinc gutters and downpipes. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 2010: 15 (8): 745-756.
- Lindfors, L.G, Christiansen K, Hoffman L, Virtanen V, Hansen O.J, Ronning A, Ekrall T, Finnveden G. 1995. Nordic guidelines on Life-Cycle Assessment. Nordic Council of Ministers. Nord 1995:20.
- Lopez-Bellido L, Munoz-Romero V, Lopez-Bellido RJ. Nitrate accumulation in the soil profile: Long-term effects of tillage, rotation and N rate in a Mediterranean Vertisol. *Soil and Tillage Research*. 2013: 130: 18-23.
- MAAF. Ministère Français de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt (MAAF). Les politiques agricoles à travers le monde : quelques exemples. 2012. On line at: www.agriculture.gouv.fr
- Maghreb émergent., 2013. L'usine Sorfert Algérie affiche de bonnes performances, deux mois après son lancement. On line at: www.maghrebemergent.com/entreprises-9/algerie/item/31670-l-usine-sorfert-algerie-affiche-de-bonnes-performances-deux-mois-apres-son-lancement.html
- Mann H.C. Triple Superphosphate, National Fertilizer & Environmental Research Center, Tennessee Valley Authority, Muscle Shoals, AL, February 1992.
- Matthew J.T, Jennifer L.K, Denise R.P. Life-cycle assessment as a sustainability management tool: Strengths, weaknesses, and other considerations. *Environmental Quality Management*. 211: 20 (3): 1-10.
- Matthieu V. Perspectives d'évolution pour le raisonnement de la fertilisation phosphatée. 2010. On line at: <http://www.agro-systemes.com/fichiers-pdf/5-m-vale-conference-phosphore-sept-2010-resume.pdf>
- Mattmüller M, Ineichen A. Engrais. 2011. On line at: <http://www.hls-dhs-dss.ch/textes/f/F13856.php>

- Ministère Algérien de l'Agriculture et du Développement durable (MADR), 2012
- Meadows D.H, Randers J, Meadows D.L, Behrens W.W. 1972. *The Limits to Growth: A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind*. Universe Books, New York. P. 205. ISBN : 0-87663-165-0.
- Mongelli I, Suh S, Huppes G. (2005). A Structure Comparison of two Approaches to LCA Inventory Data, Based on the MIET and ETH Databases. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 2005: 10(5): 317-324.
- Muratet B. Petites querelles et grandes guerres des engrais au XIXe siècle. 2012. On line at : www.geosoc.fr/temoignages/doc_download/223-petites-querelles-et-grandes-guerres-des-engrais-au-xixe-siecle.html
- Nyers, J.M. Source Assessment: Phosphate Fertilizer Industry, EPA-600/2-79-019c, U. S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH, May 1979.
- OPTIME, 2007. Etude de danger des installations de FERTIAL. Institut supérieure OPTIME. 10, Rue BISKRI Ali B.P 660 Annaba RP 23000 Algérie ; 2007. Pp 379.
- Osman A, Ries R. Life cycle assessment of electrical and thermal energy systems for commercial buildings. *Int J Life Cycle Assess* 2007;12(5):308–16.
- Papadopoulou P.I, Seferlis P. Generic modeling, design and optimization of industrial phosphoric acid production processes. *Chemical Engineering and Processing*. 2009: 48: 493-506.
- Patyk A. Balance of Energy Consumption and Emissions of Fertilizer Production and Supply. Reprints from the International Conference of life cycle assessment in agriculture, food and non-food agro-industry and forestry: achievements and prospects, Brussels, Belgium, 4–5 April 1996.
- Pennington DW, Potting J, Pinnveden G, Lindeijer E, Jolliet O, Rydberg T, et al. Life cycle assessment -Part 2: current impact assessment practice. *Environment International* 2004 : 30(5) : 721-739.
- Pereira, F. « *Production d'acide phosphorique par attaque chlorhydrique de minerais phosphatés avec réduction des nuisances environnementales et récupération des terres rares en tant que sous-produits* ». 2003. Thèse de Doctorat. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne et de l'Université Jean Monnet de Saint-Etienne. 2-07-2003.
- Perutz MF, Le cabinet du docteur fritz haber. 1997. on line at : <http://www.larecherche.fr/savoirs/autre/cabinet-du-docteur-fritz-haber-01-04-1997-82328>
- Pradyot P. Handbook of Inorganic Chemicals. Library of Congress Cataloging-in-Publication Data. 2002. ISBN 0-07-049439-8.
- Pré Consultant. BUWAL 250 Library. Environmental database. Swiss Packaging Institute; 2014 [On line at : <http://www.ghgprotocol.org/Third-Party-Databases/BUWAL>].
- Pré Consultant. CMLCA, A software tool for Life Cycle Assessment studies. Institute of Environmental Sciences (CML), Chain Management by Life Cycle Assessment; 2014 [On line at : <http://www.leidenuniv.nl/interfac/cml/ssp/software/cmlca/index.html>].
- Pré Consultant. Ecoinvent. An Environmental database. Swiss Centre for Life Cycle Inventories; 2014 [Online at : <http://www.ecoinvent.ch/>].

- Pré Consultant. EcoPro, Software tools dealing with environmental assessment and product development. Institute of Engineering Design and Logistics Engineering; 2014 [On line at: <http://www.ecodesign.at/methodik/software/index.en.html>].
- Pré Consultant. GABI, A product Sustainability performance solution. PE International; 2014 [On line at: <http://www.gabi-software.com/international/index/>].
- Pré Consultant. GEMIS 4.7, Life cycle assessment software package, Global Emission Model for integrated systems, Version 4.7. Öko-Institut; 2011 [On line at: <http://www.gemis.de>].
- Pré Consultant. Impact 2002+. Swiss Federal Institute of Technology Lausanne (EPFL). 2014. [On line at: <http://www.quantis-intl.com/impact2002.php>].
- Pré Consulting. PEMS. Software for environmental impacts assessment. Pira Interational; 2014 [On line at: <http://teclim.ufba.br/jsf/producaol/ecocycle%20eval%20lca%20tools.pdf>].
- Pré Consultant. SimaPro 7, product ecology consultants. Version 7. Introduction into LCA. Pré Consulting Company; 2012 [Online at: <http://www.pre.nl/simapro/manuals/default.htm>].
- Pré Consultant. TEAM 5.2, Life cycle assessment software package, Version 5.2. EcoBilan Society; 2014 [On line at: <http://ecobilan.pwc.fr/fr/boite-a-outils/team.jhtml>].
- Pré Consultant. UMBETO. Software for Life Cycle Assessment. Institute for Energy and Environmental Research ; 2014 [On line at: <http://www.umberto.de/en/versions/umberto-nxt-universal/>].
- Pré Consulting. US-IE. Environmental database. EarthShift : 2014 [On line at: http://www.earthshift.com/downloads/US-EI_database.pdf].
- Pré Consultant. US LCI. Environmental database. PE INTERNATIONAL : 2014 [On line at: <http://www.gabi-software.com/france/bases-de-donnees-acv/us-lci-database/>].
- Rebitzer G, Ekvall T, Frischknecht R, Hunkeler D, Norris G, Rydberg T, Schmidt W.P, Suh S, Weidema B.P, Pennington D.W. Life cycle assessment – Part 1: Framework, goal & scope definition, inventory analysis, and applications. *Environment International*. 2004; 30: 701-720.
- Robert G.H, William E.F. LCA- How it came About: Personal Reflections on the Origin and LCA in the USA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 1996: 1 (1): 4-7
- Rogers K, Seager T, Linkov I. Book Chapter: Multicriteria Decision Analysis and Life Cycle Assessment. Real-Time and Deliberative Decision Making. Pp 305-314. ISBN: 978-1-4020-9025-7.
- Rolf Frischknecht R, Rebitzer G. The ecoinvent database system: a comprehensive web-based LCA database. *Journal of Cleaner Production*. 2005: 13 (13-14): 1337-1343.
- Romero-Gámez M.M, Suárez-Rey E.M, Antón A, Castilla N, Soriano T. Environmental impact of greenhouse and open-field cultivation using a life cycle analysis: the case study of green bean production. *Journal of Cleaner Production*. 2012: 28: 63-69.
- SAIC, Scientific Applications International Corporation (SAIC). Life Cycle Assessment: Principles and Practice. National Risk Management Research Laboratory Office of Research and Development U.S. Environmental Protection Agency Cincinnati, Ohio 45268.
- San José D.G. La protection de l'environnement et la Convention européenne des Droits de l'Homme.


2005. Éditions du Conseil de l'Europe F-67075 Strasbourg Cedex. Pp78. ISBN : 92-871-5697-2
- Sangely, M. « *Dégradation biologique des polychlorobiphényles* ». Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique (INP) Toulouse. France.
- Savci S. Investigation of Effect of Chemical Fertilizers on Environment. *Procedia APCBEE*. 2012: 1: 287-292.
- SCF, Société Chimique de France (SCF). Chlorure de Potassium. 2013. On line at : <http://www.societechimiquedefrance.fr/extras/donnees/mine/kcl/cadkcl.htm>
- SCF, Société Chimique de France (SCF) 2014. [On line at : <http://www.societechimiquedefrance.fr/produit-du-jour/nitrate-d-ammonium-473.html>].
- Simaan A. Fritz Haber, chimiste à double visage. 2005. on line at: <http://www.pseudo-sciences.org/spip.php?article464>
- Smith V.H. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. *Eutrophication*. 2009: 61-73.
- Solidworks. Eco-Indicator (« 95 » et « 99 »). Annexe C - Outils et méthodes d'analyse du cycle de vie. [On line at: http://www.solidworks.fr/sustainability/sustainable-design-guide/3007_FRA_HTML.htm].
- SOPIB, Sulfate of Potash Information Board (SOPIB). 2012. Le Sulfate de Potassium et la Production d'Agrumes.
- Sporyshev PV, Kattsov VM. Spatiotemporal features of global warming. *Dokl Earth Sci* 2006: 410 (1): 1160–1165.
- Suh S, Huppes G. Missing inventory estimation tool using extended input-output analysis. *International Journal of Life Cycle Assessment*. 2002: 7 (3): 134-140.
- Tereos Coproduits. Sulfate de Potassium. Tereos Coproduits Route de Soissons. 2014. CS 10026 02280 BUCY LE LONG, FRANCE. On line at : <http://www.tereos-coproduits.com/sites/default/files/uploads/Sulfate-de-potassium-FR.pdf>
- Tillman A.M. Significance of decision-making for LCA methodology. *Environmental Impact Assessment Review*. 2000: 20 (1): 113-123.
- Toffoletto L, Deschênes L, Samson R. LCA of Ex-Situ Bioremediation of Diesel-Contaminated Soil. *International Journal of Life Cycle Assessment*. 2007: 10 (6): 406-416.
- TRACI. Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts (TRACI). 2012. [On line at: <http://www.epa.gov/nrmr/std/traci/traci.html>].
- Udo de Haes H.A, Jolliet O, Finnveden G, Hauschild M, Krewitt W, Müller- Wenk R. SETAC - Europe: Second Working Group on LCIA (WIA-2), Best available practice regarding impact categories and category indicators in Life Cycle Impact Assessment, Background Documents for the Second Working Group on Life Cycle Impact Assessment of SETAC - Europe. *International Journal of Life Cycle Assessment*. 1999: 4(2): 66-74.
- UNIFA, Union des industries de la fertilisation (UNIFA). Mise sur le marché des engrais. 2001. On line at : www.unifa.fr/component/phocadownload/category/2-lettres-de-l-unifa.html?download=12:lettre-n-04

- UNIFA. Union des industries de la fertilisation (UNIFA). 2005a. http://www.unifa.fr/fichiers/cd_ferti/dossiers/pdf/PI/4_PrincipauxFertilisants.pdf
- UNIFA, Union des industries de la fertilisation (UNIFA). Parlons fertilisants. 2005b. Les fertilisants et leur fabrication.
- UNIFA, Union des industries de la fertilisation (UNIFA). Fabrication des Engrais et Amendements. Fabrication des engrais phosphatés. 2010. On line at : <http://www.unifa.fr/nourrir-les-plantes/engrais-et-amendements/fabrication-des-engrais-et-amendements.html>
- UNIFA, Union des industries de la fertilisation (UNIFA). De quoi se nourrit une plante ?. 2013. On line at : <http://www.unifa.fr/nourrir-les-plantes/de-quoi-se-nourrit-une-plante-.html#azote>
- USGS, United States Geological Survey (USGS). Jasinski SM. Mineral Commodity Summaries, Phosphate Rock Statistics and Information. February, 2014. http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/phosphate_rock/mcs-2014-phosp.pdf
- Von Bidder S.D, Basin D, Caronni G. Applied Cryptography and Network Security. Chapter: Midpoints Versus Endpoints: From Protocols to Firewalls. Springer Berlin Heidelberg. 2007. P 46-64. ISBN: 978-3-540-72737-8.
- Walter R, Batchelor L.D, Webber H.J. Citrus Industry, Vol. II, University of California. 1968.
- Westkämper E, Alting, Arndt. Life Cycle Management and Assessment: Approaches and Visions Towards Sustainable Manufacturing (keynote paper). *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2000: 49 (2): 501-526.
- Wiesenberger H. State-of-the-art for the production of fertilizers with regard to the IPCC-Directive. 2002. Federal Environment Agency – Austria. MONOGRAPHIEN. Band 105. M-105. Wien.
- Williams G, Al-Ansari F. IFA Benchmarking of Global Energy Efficiency in Ammonia Production. Workshop on Energy Efficiency and CO2 Reduction Prospects in Ammonia Production, In. Ho Chi Minh City, Vietnam: IFA Technical Committee Meeting: 2007. [12-14 March].
- Wood S, Cowie A. A review of greenhouse gas emission factors for fertilizer production. Cooperative Research Centre for Greenhouse Accounting, for IEA Bioenergy Task 38. On line at: http://www.ieabioenergy-task38.org/publications/GHG_Emission_Fertilizer%20Production_July2004.pdf, 2004.
- Xiaoming P, Kraines S. Environmental Input-Output Models for Life-Cycle Analysis. Paper is supported by Alliance for Global Sustainability (AGS) and National Science Foundation of China (NSFC). July 22, 2000.
- Xinpeng X, Ping H, Shaojun Q, Mirasol F. P, Shicheng Z, Adrian M. J, Wei Z. Estimating a new approach of fertilizer recommendation across small-holder farms in China. *Field Crops Research*. 2014: 12: 10-17
- Ziadi N, Gagnon, Cambouris A. Utilisation des engrais minéraux azotés en grandes cultures : description des différentes formes et leurs impacts en agroenvironnement. CRAAQ-OAQ2007, Québec, Canada 2007. pp 29

Les Annexes

Annexe 1 : Manuel d'utilisation de GEMIS 4.7

1. Créer un nouveau processus

Étape 1 : Double clic sur l'icône de GEMIS, après il faut ouvrir le projet standard avec la commande *Fichier\Ouvrir le projet*. Ensuite, il faut continuer à travailler avec un enregistrement *invité*. Après, on doit entrer le nom d'utilisateur dans la liste appelée *sources*. Ainsi, avec l'exécution de la commande *menu data\source*, Il faut pauser le pointeur de la souris dans la liste à gauche, et cliquer sur le bouton droit de la souris. Dans le menu qui apparait, on peut choisir l'option locale *Nouveau* et saisir le nom qu'on veut dans les deux champs blancs. Enfin, il faut cliquer sur  et fermer la fenêtre «*sources*».

Étape 2 : Localiser le processus le plus semblable à celui qu'on veut créer (ici «*cheminorg\ammonia-DE-2010* »). On colle une copie dans la liste des processus en exécutant *modifier\copie* et ensuite *modifier\collé*.

2. Explication du programme GEMIS


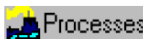


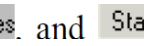
2.1 La fenêtre du programme et de système de menu GEMIS

Lorsque GEMIS démarre, la fenêtre appelée «*fenêtre du programme* » apparaît. Dans cette fenêtre, tous les travaux avec GEMIS sont faits. Au sommet de la fenêtre du programme le nom du projet actuellement ouvert s'affiche dans la barre de titre.

Ci-dessous, on peut activer les commandes dans le menu: ouvrir un fichier avec les enregistrements, les dossiers d'édition, des produits ou des procédés de la base de données, calculer des scénarios ainsi que d'ajuster les extras, organiser les fenêtres et appeler les secours. On peut cliquer avec la souris sur le menu pour activer les commandes correspondantes.

En dessous du menu, il y a plusieurs boutons. Avec le déplacement de la souris sur ces

boutons, une brève explication de la fonction correspondante apparaîtra au bas de la fenêtre du programme.

Les cinq boutons ( Products,  Processes,  Scenarios,  References, and  Standards) sont plus grands parce qu'ils sont les plus importants - ils ouvrent ce qu'on appelle la « fiches des fenêtres », un type spécial de fenêtre, qui permet un accès facile à la base de données. Chaque enregistrement dans la base de données GEMIS a son propre nom et enregistre les informations sur les cartes spécifiques. Dans les fenêtres de la carte déposée, une liste de tous les enregistrements disponibles s'affiche et on peut modifier les informations sur leurs cartes en utilisant le menu contextuel (ouvert) avec un clic droit.

2.2 Le concept de la carte GEMIS fichier

En GEMIS, l'information pour tous les enregistrements de données sont stockés dans des cartes qui peuvent être consulté en cliquant sur les onglets correspondants. Pour modifier les fiches, tout d'abord un dossier doit être marqué (sélectionné). Ce qui se passe dans ce qu'on appelle « fiches de fenêtre » qui ont tous la même structure:

Il existe des filtres de données pour déterminer quels enregistrements sont affichés dans la fenêtre de carte de fichier.

Dans la partie gauche de la fenêtre de la fiche, une liste affiche le nom de tous les dossiers qui respectent les critères choisis dans le filtre.

Dans la partie droite de la fenêtre de la carte de fichier, sont affichées les données, dans laquelle, les informations pertinentes à partir des cartes de l'enregistrement marqué sont affichées.

En vue de modifier les cartes, il faut d'abord ouvrir le menu local. Pour cela, il suffit de marquer le dossier à édité, puis (avec le pointeur de la souris positionné dans la zone de liste) un clic sur le bouton droit de la souris. Dans le menu local apparaissant, on peut "éditer".

2.3 Fenêtre Carte du fichier Products :

En supposant qu'on va ouvrir le fichier de carte pour les produits en cliquant sur le

bouton  Products .

Puis, dans la partie gauche de la fenêtre de la carte est déposée une liste triée par ordre alphabétique des produits. Les icônes devant le nom indique à quel groupe appartient le produit. La couleur de son nom l'indique par exemple que le produit appartient à des données fondamentales protégées.

Lors de l'ouverture de la fenêtre « fiche de produits », les filtres de données montrent tous les produits du projet actuellement chargé dans l'ordre alphabétique, et le premier produit est marqué automatiquement (on peut voir que le nom du produit est affiché dans une couleur plus foncée).

On utilisant le menu contextuel (clic droit), un produit marqué peut être renommé (s'il n'appartient pas à des données fondamentales protégées), copié ou supprimé (si aucun autre dossier n'a un lien vers lui, c'est-à-dire, s'il est inutilisé). Par ailleurs, le menu local nous offre la fonction de montrer les liens qui répertorient tous les processus qui sont liés au produit marqué.

Pour accéder aux cartes de fichier (par exemple la carte des données) d'un produit, double-clique sur son nom dans la liste sur la partie gauche de la fenêtre.

Les chapitres suivants expliquent l'édition des données de produits sélectionnés dans GEMIS:

2.3.1 Editer les Produits: carte "Données" de porteurs d'énergie

Si le produit marqué est un vecteur d'énergie, mais pas un carburant, la carte de données contient les informations suivantes: - Le contenu énergétique, - Energie par unité de masse, - Coûts, - Les coûts variables du porteur d'énergie.

2.3.2 Modifier le produit: carte "Données" des matériaux

La carte des «données» des matériaux a deux champs de saisie des données:

- La capacité de neutralisation - si le matériau est capable de fixer des substances

nocives comme le soufre ou le chlore, par réaction chimique, entrez la valeur ici - plus d'info vous pouvez trouver dans la documentation du modèle ;

- Coûts - entrez les coûts variables de la matière choisie ici

2.3.3 Modifier le produit: carte "Données" des ressources

Dans cette carte, on peut déterminer si la ressource est renouvelable, non renouvelable ou secondaire. Cette catégorie est utilisée par GEMIS pour déterminer le solde des ressources, en particulier la DEC.

2.3.4 Modifier la carte de "données" des produits définis par l'utilisateur: émissions atmosphériques, émissions liquides et résidus

Dans la carte des données d'émissions liquides définis par l'utilisateur et les résidus définis par l'utilisateur, on peut entrer les coûts externes spécifiques et un code de système abstrait chimique (SAC) pour le produit.

De plus, les valeurs équivalentes de CO₂, SO₂, et TOPP peuvent être saisies pour les émissions atmosphériques définies par l'utilisateur.

2.4 La fenêtre de la carte du fichier Processus:

Dans la fenêtre de « la fiche de processus », on peut voir la liste par ordre alphabétique des processus sur le côté gauche.

Les noms processus ont des couleurs différentes. Dans la carte « Info » à droite, les informations pertinentes à partir des cartes de données des processus marqués sont résumées (il faut noter qu'on ne peut pas modifier les données dans la carte info).

Pour limiter la liste des processus affichés, on peut accéder à « la carte filtre », il suffit de cliquer sur l'onglet « Filtre » sur le côté droit. Ici on peut choisir des critères pour la récupération de données dans plusieurs listes déroulantes. On déplaçant la souris sur les différentes zones de « la carte de filtre », une brève explication est indiquée au bas de la fenêtre.

2.4.1 Les carte de processus de combustion

On peut trouver des procédés de combustion dans GEMIS facilement en utilisant le filtre de données « Type de Processus ».

La première carte des processus de combustion est la carte de métadonnées (Meta data).

2.4.1.1 La carte "méta données"

La carte des métadonnées explique le contexte des données d'un processus.

Dans la partie supérieure gauche de la carte, on peut lier des références avec le processus pour informer les autres sur l'origine des données de processus. Il suffit de faire un clic droit sur la liste pour ajouter ou supprimer des références.

Ci-dessous - dans le cadre de «source de données et revue" – on trouve des informations sur l'origine des données - en premier lieu la liste « source » où on peut choisir une organisation ou un groupe qui est responsable de l'enregistrement. Si un processus est copié, l'original est conservé - mais on peut choisir une autre source lors de la copie. Au-dessous les listes déroulantes « l'entrée de données par », «réviser par » et « Etat de la révision ».

Dans la partie supérieure droite de la carte, on peut choisir l'indicateur de qualité de données qui représente le enregistrement – un clique sur l'un des cinq points. Il faut noter que la qualité des données choisie est visible dans la carte d'information si la carte de données Meta est fermé.

Ci-dessous le cadre de « regroupement » avec les listes déroulantes: Technologie ; Tech. Statut ; Année de référence; NACE; Situation ; SNAP.

À la droite de zone de liste « Localisation » est un petit bouton de couleur. Il est pour la création de nouveaux lieux (par exemple les sous-régions, villes ...).

2.4.1.2 Carte "Commentaire"

La carte de commentaires est pour l'édition le commentaire en allemand et en anglais de l'enregistrement vérifié pour le moment.

2.4.1.3 Carte "Data" (combustion)

Cette carte sert de fixer les données énergétiques et matérielles du processus.

Dans le coin supérieur gauche de la carte, le lien actuellement fixé au processus en amont (son symbole de la technologie en face de lui) ainsi que - en dessous - le nom de produit d'entrée, qui est fourni par ce processus - ici aussi le symbole correspondant est affiché. Si on veut choisir un autre processus en amont, un clic sur le bouton. Puis GEMIS ouvre une fenêtre où on peut choisir le lien contribution au processus amont. Dans cette fenêtre, la liste des processus est dans la partie droite de la fenêtre, et à gauche, on peut définir plusieurs filtres de données afin de réduire le nombre de processus affichés. Les filtres de données sont la puissance (taille) ainsi que les catégories d'entrée et de sortie du produit, la technologie et l'emplacement. On peut choisir un processus en amont en cliquant sur son nom dans la liste de la région, puis en cliquant sur "OK"-bouton - puis le «Sélectionner processus » la fenêtre est fermée et le nom du processus apparaît à l'envers, à gauche, avec son symbole.

Au-dessus de la liste de sortie est apparu le symbole du transporteur d'énergie choisie ainsi qu'une flèche verte derrière, dont la largeur représente l'efficacité sortie en énergie du processus de combustion. La largeur de la flèche brune représente quantitativement les pertes énergétiques. L'efficacité de la conversion d'énergie est indiquée ci-dessus. ON peut l'ajuster sur la carte de « Design ».

2.4.1.3.1 "Design" Carte

Si on clic sur le bouton « Design » sur la carte « Données », GEMIS ouvre une nouvelle fenêtre où on peut modifier les données de conception du processus.

Pour la gauche, sur le haut, il y a les champs de saisie pour le temps de fonctionnement, le processus est exécuté normalement. (Il faut noter que les heures de pleine charge équivalente sont recensées ici).

Au dessous des valeurs de puissance qu'on peut fixer, la part du pouvoir qui est formé. Pour la gauche, au bas de la fenêtre, on peut entrer la durée de vie, la superficie, et les données de l'emploi.

Pour la droite, au bas de la fenêtre, on trouve des données d'efficacité du processus - pour les procédés de combustion on introduit le rendement brut et (sous elle) GEMIS affiche le rendement net qui résulte de l'inclusion de la demande énergétique des procédés de Technologie de Contrôle des Emissions liées (le cas échéant). Si aucun (TCE) est liée au processus de combustion, brut est égal au net.

2.4.1.4 Carte "auxiliaires"

Sur cette carte, on peut voir et modifier des liens auxiliaires du processus dans les trois tableaux:

- Le tableau supérieur est pour les processus de fourniture d'énergie auxiliaire, à savoir les montants d'énergie nécessaire en plus le produit d'entrée de l'exploitation du processus (par exemple l'électricité auxiliaire). Ici, le nom du processus qui fournit l'énergie auxiliaire est donnée, après, le nom du transporteur d'énergie livrée, puis la quantité d'énergie qu'elle est requise par le processus dans la colonne suivante.

- Le tableau du milieu est pour les processus de fourniture de matières auxiliaires (p.ex. lubrifiants) - encore une fois, d'abord le nom du processus auxiliaires est donné, après, le nom du matériel auxiliaire livré, puis la quantité de matériel nécessaire au processus, basé sur la sortie.

- Le tableau le plus bas est pour les processus de livraison des matériaux nécessaires à la construction du processus - ce qui reflète l'étape «Berceau» du cycle de vie de processus. Comme avant, tout d'abord le nom du processus prestation est donné.

2.4.1.5 Carte «émissions» (combustion)

Cette carte décrit les détails des polluants atmosphériques et les émissions de gaz à effet de serre (GES) des processus de combustion.

Dans la partie supérieure gauche de la carte, on peut relier jusqu'à trois technologies de contrôle d'émissions (TCE) - un par zone de liste - il suffit de cliquer sur l'une des listes déroulantes, puis sur le nom du processus TCE approprié. Il faut noter que GEMIS ne répertorie que les processus de TCE qui «fit» la capacité du processus de combustion - un

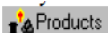

« petit » filtre ne peut pas être relié à une « grande » centrale électrique. GEMIS va rapporter les coûts résultants à carte coûts du processus.

Les processus TCE ont souvent besoin d'énergie auxiliaire (électricité, vapeur). Avec la liste «Énergie pour le traitement de fumées" dans la partie supérieure droite de la carte, on peut décider d'où cette énergie provient- le réglage par défaut est « sortie de processus». Dans ce cas GEMIS calcule le rendement net de ce processus.

2.4.1.6 Carte "Résidus"

Cette carte se compose de plusieurs champs de données d'entrée pour les résidus solides et liquides (émissions) en forme de facteurs d'émission qui sont toujours basés sur la sortie du processus.

- pour les procédés d'extraction, de transformation et de transport, c'est le contenu énergétique (pouvoir calorifique) ou la masse du produit livré, par exemple, en kg/TJ ou kg/t, respectivement
- pour les transports, c'est le service de transport. C'est à dire en kg/km ou en kg/t*km.

Dans la partie supérieure gauche de la carte, Il y a des champs pour les cendres, résidus de désulfuration, les boues d'épuration, production de déchets et stériles. Afin d'insérer un nouveau résidu, il faut d'abord ouvrir la carte de la fenêtre de fichier «produits» en cliquant sur  et pour définir le nouveau résidu comme un produit. Ensuite, il faut ouvrir le fichier fenêtre de la carte "processus" à nouveau (clic sur ) , on déplaçant le pointeur de la souris dans le tableau supérieure sur les résidus de la carte et on cliquant sur la clé droite de la souris. Il faut choisir «Insérer ligne » et sélectionner le nouveau résidu dans la fenêtre qui vient d'être ouvert.

L'insertion d'un nouveau liquide des effluents (dans le bas du tableau) aura lieu de la même manière.

On peut utiliser les procédés de la technologie de contrôle des émissions que pour la réduction des émissions de polluants atmosphériques et de GES des procédés de combustion, pas de résidus.

Annexe 2 : Tableaux des émissions détaillées

Tableau A. Les émissions liées au cycle d'Ammoniac (t/t)

Gaz à effet de serre	Emissions dans l'air		
équivalent CO ₂	1,444	Poussière	4,308x10 ⁻⁶
CO ₂	1,327	As (air)	28,48x10 ⁻¹⁵
CH ₄	4,606x10 ⁻³	Cd (air)	17,61x10 ⁻¹⁵
N ₂ O	4,88x10 ⁻⁶	Cr (air)	133,5x10 ⁻¹⁵
Perfluoromethane	8,191x10 ⁻¹⁵	Hg (air)	34,78x10 ⁻¹⁵
perfluoroethane	1,029x10 ⁻¹⁵	Ni (air)	132,5x10 ⁻¹⁵
Acidification		PAH (air)	1,965x10 ⁻¹⁸
équivalent SO ₂	259,4x10 ⁻⁶	Pb (air)	868,7x10 ⁻¹⁵
NOx	371,5x10 ⁻⁶	PCDD/F (air)	1,337x10 ⁻¹⁸
SO ₂	0,680x10 ⁻⁶	Résiduels solides	
NH ₃	121,8x10 ⁻¹⁵	Boues d'épuration	71,14x10 ⁻⁹
HCl	7,216x10 ⁻¹²	Déchets de production	161,5x10 ⁻⁹
HF	401,2x10 ⁻¹⁵	Mort-terrain	3,180x10 ⁻⁶
H ₂ S	709,2x10 ⁻¹²	effluents Liquides	
Formation d'Ozone Troposphérique		P	3,256x10 ⁻¹⁵
équivalent-TOPP	549,56x10 ⁻⁶	N	665,2x10 ⁻¹⁵
CH ₄	4,606x10 ⁻³	AOX	4,270x10 ⁻¹⁵
NOx	371,58x10 ⁻⁶	DCO	11,109x10 ⁻⁹
CO	185,36x10 ⁻⁶	DBO ₅	311,6x10 ⁻¹²
NMVOC	11,353x10 ⁻⁶	Sel inorganique	12,02x10 ⁻¹²
Dépense d'Énergie Cumulée (MJ)		Dépense de matériau Cumulée (t)	
CER-non renouvelable	51,945x10 ³	CMR-non renouvelable	0,588
CER- renouvelable	80,241x10 ⁻⁶	CMR- renouvelable	1,5634
CER-somme	51,945x10 ³	CMR-somme	2,151

Tableau B. Les émissions liées au cycle de d'Acide nitrique (t/t)

Gaz à effet de serre	Emissions dans l'air		
équivalent CO ₂	2,2849	Poussière	3,7816x10 ⁻⁶
CO ₂	596,87x10 ⁻³	As (air)	14,98x10 ⁻¹²
CH ₄	1,8286x10 ⁻³	Cd (air)	9,261x10 ⁻¹²
N ₂ O	5,5114x10 ⁻³	Cr (air)	70,20x10 ⁻¹²
Perfluoromethane	4,307x10 ⁻¹²	Hg (air)	18,29x10 ⁻¹²
perfluoroethane	541,3x10 ⁻¹⁵	Ni (air)	69,67x10 ⁻¹²
Acidification		PAH (air)	1,035x10 ⁻¹⁵
équivalent SO ₂	3,6228x10 ⁻³	Pb (air)	456,7x10 ⁻¹²
NOx	4,9294x10 ⁻³	PCDD/F (air)	702,8x10 ⁻¹⁸
SO ₂	2,6291x10 ⁻⁶	Résiduels solides	
NH ₃	100,00x10 ⁻⁶	Boues d'épuration	54,946x10 ⁻⁹
HCl	3,8186x10 ⁻⁹	Déchets de production	72,482x10 ⁻⁶
HF	212,9x10 ⁻¹²	Mort-terrain	1,6760x10 ⁻³
H ₂ S	278,7x10 ⁻¹²	effluents Liquides	
Formation d'Ozone Troposphérique		P	1,712x10 ⁻¹²
équivalent-TOPP	4,4437x10 ⁻³	N	100,8x10 ⁻¹²
CH ₄	1,8286x10 ⁻³	AOX	1,747x10 ⁻¹²
NOx	4,9294x10 ⁻³	DCO	5,8397x10 ⁻⁶
CO	236,70x10 ⁻⁶	DBO ₅	163,81x10 ⁻⁹
NMVOC	20,385x10 ⁻⁶	Sel inorganique	2,3385x10 ⁻⁹
Dépense d'Énergie Cumulée (MJ)		Dépense de matériau Cumulée (t)	

CER-non renouvelable	20,4253x10 ³	CMR-non renouvelable	167,35x10 ⁻³
CER- renouvelable	42,353x10 ⁻³	CMR- renouvelable	7,3099493
CER-somme	20,4260x10 ³	CMR-somme	7,4773602

Tableau C. Les émissions liées au cycle de CAN (t/t)

Gaz à effet de serre	Emissions dans l'air		
équivalent CO ₂	1,8628	Poussière	5,2030x10 ⁻⁶
CO ₂	646,01x10 ⁻³	As (air)	22,96x10 ⁻¹²
CH ₄	2,0611x10 ⁻³	Cd (air)	35,75x10 ⁻¹²
N ₂ O	3,9103x10 ⁻³	Cr (air)	67,22x10 ⁻¹²
Perfluoromethane	638,7x10 ⁻¹²	Hg (air)	15,65x10 ⁻¹²
perfluoroethane	64,12x10 ⁻¹²	Ni (air)	628,2x10 ⁻¹²
Acidification		PAH (air)	45,97x10 ⁻¹⁵
équivalent SO ₂	2,6331x10 ⁻³	Pb (air)	393,0x10 ⁻¹²
NO _x	3,5862x10 ⁻³	PCDD/F (air)	574,0x10 ⁻¹⁸
SO ₂	2,7625x10 ⁻⁶	Résiduels solides	
NH ₃	70,934x10 ⁻⁶	Boues d'épuration	382,17x10 ⁻⁹
HCl	4,1794x10 ⁻⁹	Déchets de production	58,253x10 ⁻⁶
HF	396,1x10 ⁻¹²	Mort-terrain	42,737x10 ⁻³
H ₂ S	316,8x10 ⁻¹²	effluents Liquides	
Formation d'Ozone Troposphérique		P	68,48x10 ⁻¹²
équivalent-TOPP	4,4437x10 ⁻³	N	4,0179x10 ⁻⁹
CH ₄	2,0611x10 ⁻³	AOX	6,236x10 ⁻¹²
NO _x	3,5862x10 ⁻³	DCO	4,4253x10 ⁻⁶
CO	207,97x10 ⁻⁶	DBO ₅	125,37x10 ⁻⁹
NMVOC	16,782x10 ⁻⁶	Sel inorganique	136,61x10 ⁻⁹
Dépense d'Énergie Cumulée (MJ)		Dépense de matériau Cumulée (t)	
CER-non renouvelable	23,1214x10 ³	CMR-non renouvelable	435,88x10 ⁻³
CER- renouvelable	118,45x10 ⁻³	CMR- renouvelable	5,6406483
CER-somme	23,1219x10 ³	CMR-somme	6,0765768

Tableau D. Les émissions liées au cycle de Sulfazot (t/t)

Gaz à effet de serre	Emissions dans l'air		
équivalent CO ₂	8,6494	Poussière	2,3361x10 ⁻³
CO ₂	3,4214	As (air)	-4,0126x10 ⁻⁹
CH ₄	3,4649x10 ⁻³	Cd (air)	-399,1x10 ⁻¹²
N ₂ O	17,253x10 ⁻³	Cr (air)	-1,9645x10 ⁻⁹
Perfluoromethane	-2,079x10 ⁻¹²	Hg (air)	-3,8287x10 ⁻⁹
perfluoroethane	-2,830x10 ⁻¹²	Ni (air)	-3,0149x10 ⁻⁹
Acidification		PAH (air)	616,3x10 ⁻¹²
équivalent SO ₂	29,728x10 ⁻³	Pb (air)	-12,052x10 ⁻⁹
NO _x	16,688x10 ⁻³	PCDD/F (air)	1,165x10 ⁻¹²
SO ₂	5,4121x10 ⁻³	Résiduels solides	
NH ₃	6,7291x10 ⁻³	Boues d'épuration	-141,25x10 ⁻⁹
HCl	46,950x10 ⁻⁶	Déchets de production	-109,19x10 ⁻⁶
HF	-462,31x10 ⁻⁹	Mort-terrain	-101,97x10 ⁻³
H ₂ S	247,1x10 ⁻¹²	effluents Liquides	
Formation d'Ozone Troposphérique		P	10,60x10 ⁻¹²
équivalent-TOPP	20,996x10 ⁻³	N	620,9x10 ⁻¹²
CH ₄	3,4649x10 ⁻³	AOX	-1,671x10 ⁻¹²
NO _x	16,688x10 ⁻³	DCO	-8,8184x10 ⁻⁶
CO	2,5917x10 ⁻³	DBO ₅	-247,19x10 ⁻⁹

NMVOC	302,97x10 ⁻⁶	Sel inorganique	21,915x10 ⁻⁹
Dépense d'Énergie Cumulée (MJ)		Dépense de matériau Cumulée (t)	
CER-non renouvelable	40,6994x10 ³	CMR-non renouvelable	475,12x10 ⁻³
CER- renouvelable	6,0424962	CMR- renouvelable	22,917394
CER-somme	40,7079x10 ³	CMR-somme	23,518143

Tableau E. Les émissions liées au cycle de TSP (t/t)

Gaz à effet de serre		Emissions dans l'air	
équivalent CO ₂	1,9020	Poussière	2,7214x10 ⁻³
CO ₂	1,7898	As (air)	-6,7117x10 ⁻⁹
CH ₄	3,6406x10 ⁻³	Cd (air)	-471,0x10 ⁻¹²
N ₂ O	70,516x10 ⁻⁶	Cr (air)	-2,8554x10 ⁻⁹
Perfluoromethane	20,335x10 ⁻⁹	Hg (air)	-6,4291x10 ⁻⁹
perfluoroethane	2,5225x10 ⁻⁹	Ni (air)	-1,6355x10 ⁻⁹
Acidification		PAH (air)	856,1x10 ⁻¹²
équivalent SO ₂	33,644x10 ⁻³	Pb (air)	-17,571x10 ⁻⁹
NO _x	13,207x10 ⁻³	PCDD/F (air)	172,1x10 ⁻¹⁵
SO ₂	23,942x10 ⁻³	Résiduels solides	
NH ₃	13,501x10 ⁻⁶	Boues d'épuration	26,436x10 ⁻⁶
HCl	460,89x10 ⁻⁶	Déchets de production	19,774515
HF	47,979x10 ⁻⁶	Mort-terrain	3,7948705
H ₂ S	-528,3x10 ⁻¹²	effluents Liquides	
Formation d'Ozone Troposphérique		P	392,4x10 ⁻¹²
équivalent-TOPP	16,841x10 ⁻³	N	23,183x10 ⁻⁹
CH ₄	3,6406x10 ⁻³	AOX	34,76x10 ⁻¹²
NO _x	13,207x10 ⁻³	DCO	21,407x10 ⁻⁶
CO	1,9868x10 ⁻³	DBO ₅	615,81x10 ⁻⁹
NMVOC	459,43x10 ⁻⁶	Sel inorganique	34,591x10 ⁻⁶
Dépense d'Énergie Cumulée (MJ)		Dépense de matériau Cumulée (t)	
CER-non renouvelable	13,1520x10 ³	CMR-non renouvelable	1,2415363
CER- renouvelable	21,189953	CMR- renouvelable	69,271054
CER-somme	13,1809x10 ³	CMR-somme	70,727845

Tableau F. Les émissions liées au cycle de SSP (t/t)

Gaz à effet de serre		Emissions dans l'air	
équivalent CO ₂	1,0187	Poussière	2,3944x10 ⁻³
CO ₂	1,0098	As (air)	-2,2853x10 ⁻⁹
CH ₄	-156,27x10 ⁻⁶	Cd (air)	-140,0x10 ⁻¹²
N ₂ O	42,511x10 ⁻⁶	Cr (air)	-1,0622x10 ⁻⁹
Perfluoromethane	9,0360x10 ⁻⁹	Hg (air)	-2,2065x10 ⁻⁹
perfluoroethane	1,1173x10 ⁻⁹	Ni (air)	23,93x10 ⁻¹²
Acidification		PAH (air)	1,3302x10 ⁻⁹
équivalent SO ₂	26,160x10 ⁻³	Pb (air)	-6,6227x10 ⁻⁹
NO _x	12,016x10 ⁻³	PCDD/F (air)	270,8x10 ⁻¹⁵
SO ₂	17,755x10 ⁻³	Résiduels solides	
NH ₃	19,637x10 ⁻⁶	Boues d'épuration	1,0977x10 ⁻⁶
HCl	3,2558x10 ⁻⁶	Déchets de production	106,30x10 ⁻⁶
HF	-236,03x10 ⁻⁹	Mort-terrain	243,95x10 ⁻³
H ₂ S	-169,4x10 ⁻¹²	effluents Liquides	
Formation d'Ozone Troposphérique		P	211,1x10 ⁻¹²
équivalent-TOPP	15,462x10 ⁻³	N	12,385x10 ⁻⁹
CH ₄	-156,27x10 ⁻⁶	AOX	14,82x10 ⁻¹²

NOx	12,016x10 ⁻³	DCO	-1,9169x10 ⁻⁶
CO	1,9236x10 ⁻³	DBO ₅	-46,504x10 ⁻⁹
NMVOC	593,67x10 ⁻⁶	Sel inorganique	19,080x10 ⁻⁶
Dépense d'Énergie Cumulée (MJ)		Dépense de matériau Cumulée (t)	
CER-non renouvelable	495,83413	CMR-non renouvelable	303,65x10 ⁻³
CER- renouvelable	8,1406231	CMR- renouvelable	14,993087
CER-somme	505,61376	CMR-somme	15,369660

Tableau G. Les émissions liées au cycle de NPK 3x15ch (t/t)

Gaz à effet de serre	Emissions dans l'air	
équivalent CO ₂	2,9899	Poussière 1,9116x10 ⁻³
CO ₂	2,1440	As (air) -2,0381x10 ⁻⁹
CH ₄	4,9294x10 ⁻³	Cd (air) -182,9x10 ⁻¹²
N ₂ O	2,4251x10 ⁻³	Cr (air) -850,2x10 ⁻¹²
Perfluoromethane	1,6801x10 ⁻⁹	Hg (air) -1,9397x10 ⁻⁹
perfluoroethane	202,5x10 ⁻¹²	Ni (air) -1,2223x10 ⁻⁹
Acidification		PAH (air) 856,7x10 ⁻¹²
équivalent SO ₂	23,445x10 ⁻³	Pb (air) -5,2453x10 ⁻⁹
NOx	11,802x10 ⁻³	PCDD/F (air) 174,9x10 ⁻¹⁵
SO ₂	14,969x10 ⁻³	Résiduels solides
NH ₃	55,420x10 ⁻⁶	Boues d'épuration 7,6911x10 ⁻⁶
HCl	148,63x10 ⁻⁶	Déchets de production 7,4944611
HF	14,975x10 ⁻⁶	Mort-terrain 1,1509239
H ₂ S	516,5x10 ⁻¹²	effluents Liquides
Formation d'Ozone Troposphérique		P 6,344x10 ⁻¹²
équivalent-TOPP		N 423,7x10 ⁻¹²
CH ₄	4,9294x10 ⁻³	AOX 2,759x10 ⁻¹²
NOx	11,802x10 ⁻³	DCO 7,9715x10 ⁻⁶
CO	1,7036x10 ⁻³	DBO ₅ 224,68x10 ⁻⁹
NMVOC	420,04x10 ⁻⁶	Sel inorganique 280,25x10 ⁻³
Dépense d'Énergie Cumulée (MJ)		Dépense de matériau Cumulée (t)
CER-non renouvelable	46,4439x10 ³	CMR-non renouvelable 1,0527476
CER- renouvelable	6,5220727	CMR- renouvelable 29,192829
CER-somme	46,4546x10 ³	CMR-somme 30,312787

Tableau H. Les émissions liées au cycle de NPK 3x15s (t/t)

Gaz à effet de serre	Emissions dans l'air	
équivalent CO ₂	2,9555	Poussière 1,9150x10 ⁻³
CO ₂	2,1129	As (air) -3,1356x10 ⁻⁹
CH ₄	4,8066x10 ⁻³	Cd (air) -293,3x10 ⁻¹²
N ₂ O	2,4241x10 ⁻³	Cr (air) -1,3906x10 ⁻⁹
Perfluoromethane	1,7226x10 ⁻⁹	Hg (air) -2,9872x10 ⁻⁹
perfluoroethane	206,8x10 ⁻¹²	Ni (air) -2,0555x10 ⁻⁹
Acidification		PAH (air) 856,5x10 ⁻¹²
équivalent SO ₂	23,859x10 ⁻³	Pb (air) -8,5687x10 ⁻⁹
NOx	11,783x10 ⁻³	PCDD/F (air) 173,5x10 ⁻¹⁵
SO ₂	15,398x10 ⁻³	Résiduels solides
NH ₃	55,423x10 ⁻⁶	Boues d'épuration 7,7253x10 ⁻⁶
HCl	147,29x10 ⁻⁶	Déchets de production 7,6982581
HF	15,070x10 ⁻⁶	Mort-terrain 1,1524688
H ₂ S	435,3x10 ⁻¹²	effluents Liquides
Formation d'Ozone Troposphérique		P 6,417x10 ⁻¹²

équivalent-TOPP	$15,046 \times 10^{-3}$ N	$428,3 \times 10^{-12}$
CH ₄	$4,8066 \times 10^{-3}$ AOX	$1,993 \times 10^{-12}$
NOx	$11,783 \times 10^{-3}$ DCO	$5,1916 \times 10^{-6}$
CO	$1,6755 \times 10^{-3}$ DBO ₅	$146,75 \times 10^{-9}$
NM VOC	$418,81 \times 10^{-6}$ Sel inorganique	$304,55 \times 10^{-3}$
Dépense d'Énergie Cumulée (MJ)		Dépense de matériau Cumulée (t)
CER-non renouvelable	$46,1027 \times 10^3$	CMR-non renouvelable 1,0923419
CER- renouvelable	8,4096692	CMR- renouvelable 33,887519
CER-somme	$46,1160 \times 10^3$	CMR-somme 35,081583

Annexe 3 : Figures des scénarios d'émission pour les fertilisants

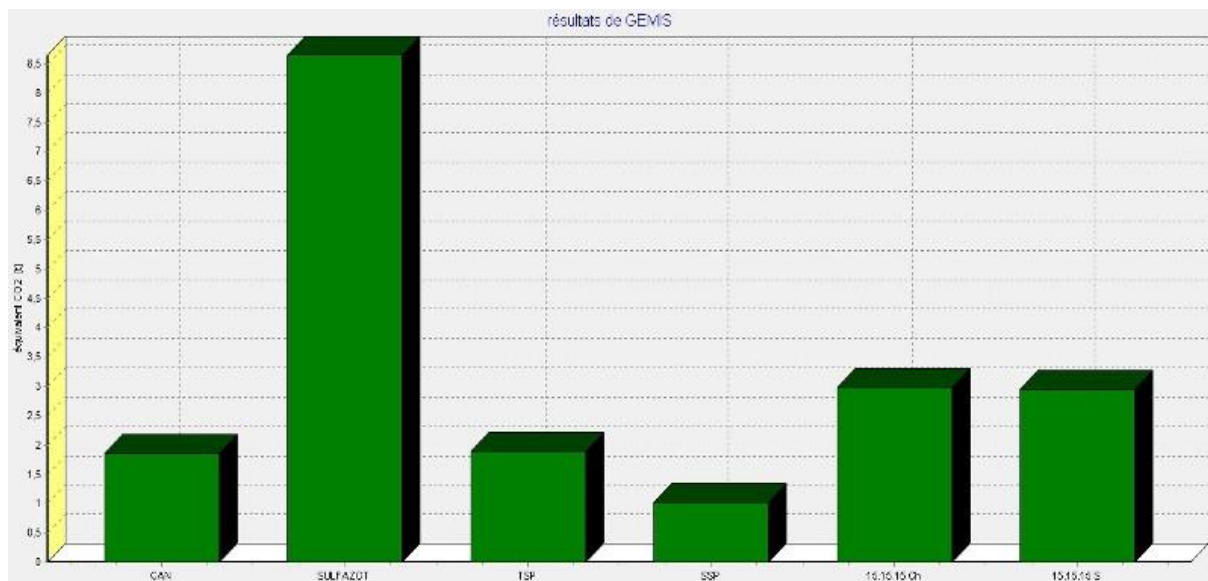


Fig. A. Présentation graphique de l'émission des GES des fertilisants en CO₂ eq

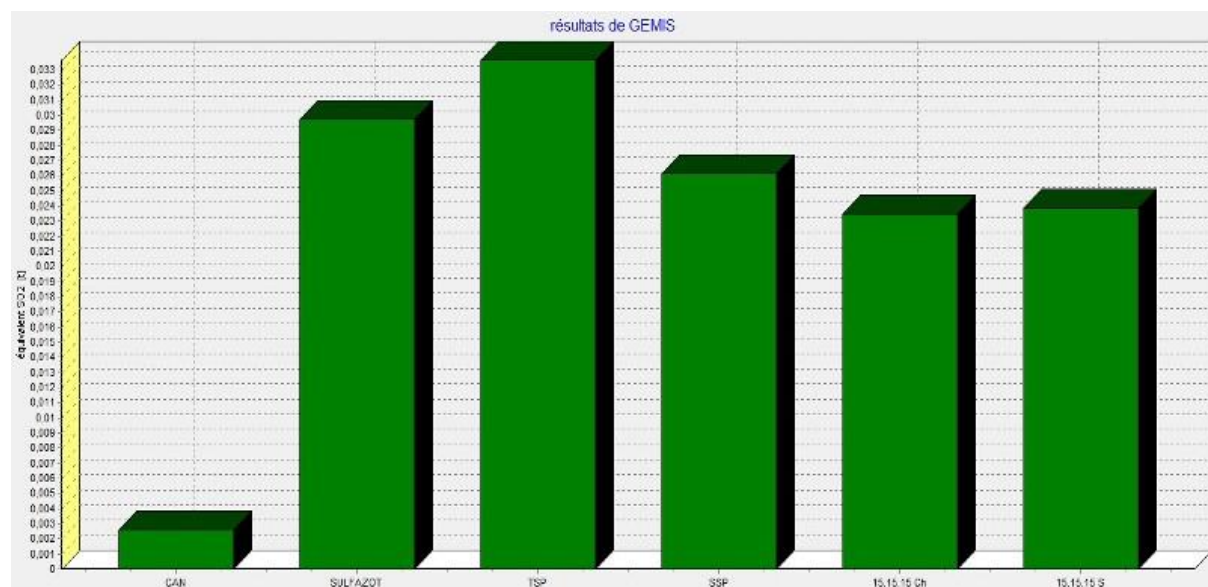


Fig. B. Présentation graphique de l'acidification pour tous les fertilisants en SO₂ eq

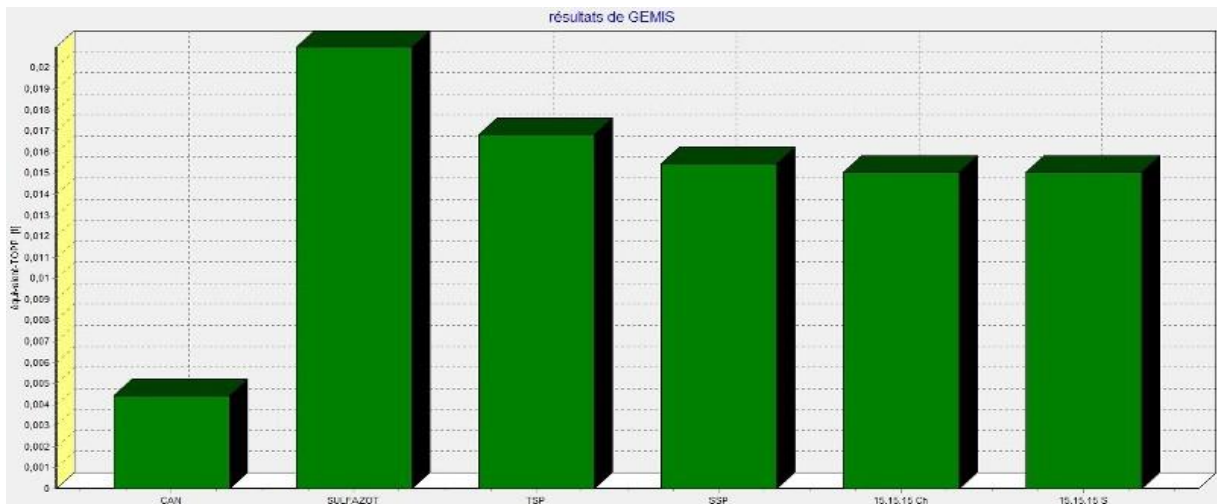


Fig. C. Présentation graphique de PPOT pour tous les fertilisants en COVNM eq

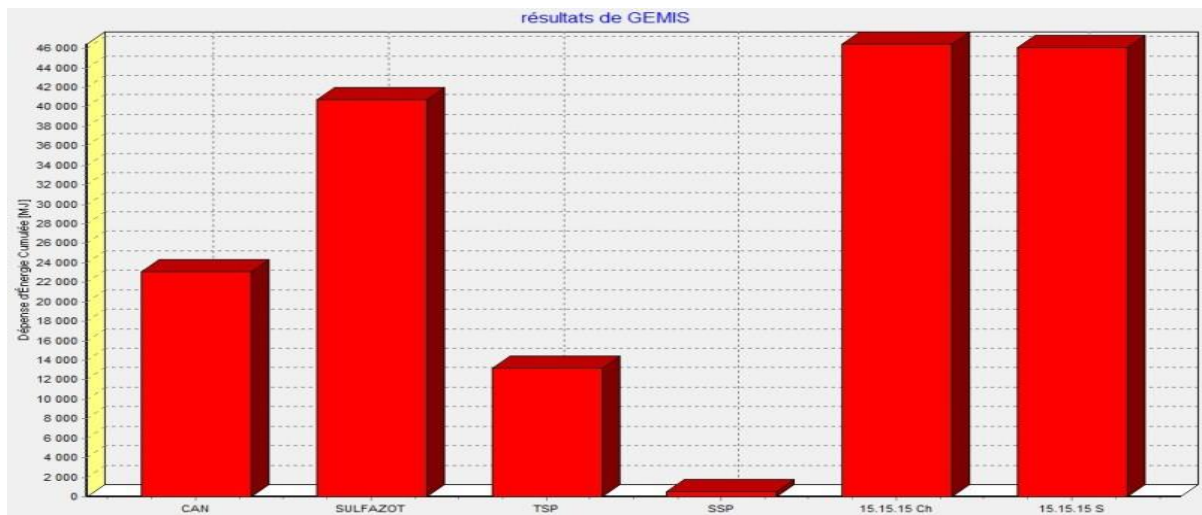


Fig. D. Présentation graphique de DEC pour tous les fertilisants en MJ

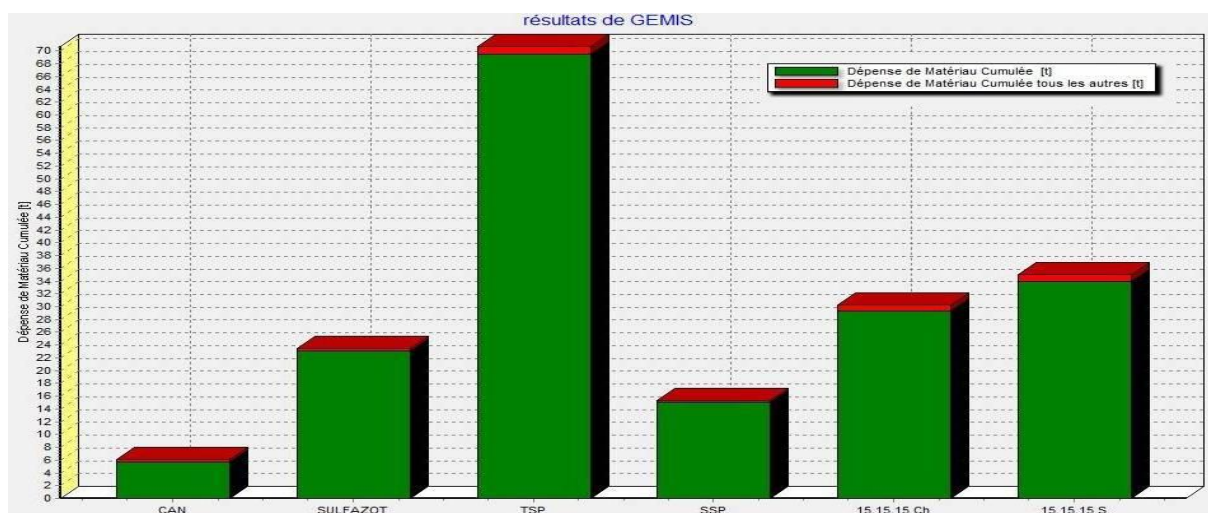


Fig. D. Présentation graphique de DMC pour tous les fertilisants en T