



Université Senghor

Université internationale de langue française
au service du développement africain

Opérateur direct de la Francophonie

**CONTRIBUTION A L'EVALUATION DES PERFORMANCES ENVIRONNEMENTALES
DES ENTREPRISES MINIERES: PERSPECTIVES POUR LES ENTREPRISES
MINIERES CAMEROUNAISES**

Présenté par

Martin Luther NJOYA FENJOU

pour l'obtention du Master en Développement de l'Université Senghor

Département Environnement

Spécialité « Gestion de l'environnement »

le 13 Mars 2011

Devant le jury composé de :

Dr. Martin Yelkouni Président

Directeur du Département Environnement

Pr. Thierry Verdel Examineur

Ecole des Mines de Nancy

Dr. Olivier Mirgaux Examineur

Maître de Conférences, Ecole des Mines de Nancy

Dr. Yasser El Shayeb Examineur

Maître de Conférences à l'Université du Caire

Remerciements

Au terme de ce travail, il m'est agréable d'exprimer toute ma reconnaissance à tous ceux qui, de près ou de loin, d'une manière ou d'une autre ont contribué à sa réalisation. Pour cela, j'adresse mes sincères remerciements à :

Mirgaux Olivier, Maîtres de conférences à l'Ecole des Mines de Nancy en France, qui a bien voulu m'initier à l'analyse de cycle de vie et suivre ce travail avec beaucoup d'attention et de rigueur. Qu'il trouve ici l'expression de ma sincère gratitude

Verdel Thierry, Professeur à l'Ecole des Mines de Nancy pour avoir rendu possible mon admission en stage dans la prestigieuse Ecole des Mines de Nancy, ainsi que pour toutes ses orientations et conseils

Yelkouni Martin, Directeur du Département Environnement à l'Université Senghor d'Alexandrie, pour ses orientations, ses précieux conseils et amendements, apportés à ce travail

Tous les enseignants du Département Environnement pour leur savoir et leur connaissance dont j'ai bénéficié

FOMETE Timothée, Chargé de cours à l'université de Dschang-Cameroun et Directeur Associé du Cabinet d'Etudes Rainbow Environment Consult (REC-Sarl), pour mon adoption et toutes les facilités mises à ma disposition

Monsieur TCHINDA YEFOU Aubin, Chargé d'Etudes au Cabinet Rainbow Environment Consult (REC Sarl) et toute sa famille pour son soutien moral et matériel et amical dont je bénéficie jusqu'ici

Tous mes collègues du Cabinet d'études Rainbow Environnement Consult (REC Sarl) pour leurs encouragements

Tous mes camarades du Département Environnement pour le climat d'échanges, de solidarité et de collaboration que nous avons su développer

Ma famille d'accueil à Nancy, qui a rendu possible et agréable mon séjour en France

Mon grand-frère MOULIOM NJOYA Edouard, pour tous les sacrifices consentis à mon endroit durant ces deux années

Tous mes frères et sœurs pour leurs prières et leurs encouragements

Je tiens également à remercier toute la communauté camerounaise de l'Université Senghor pour la fraternité, le soutien moral et matériel dont j'ai bénéficié.

Merci à tous.

Dédicace

*A mon feu père NJI NGOUNGA Joseph qui aurait bien voulu me voir retourner au Cameroun lui présenter ce précieux sésame.
Que son âme repose en paix...*

A ma tendre Maman...

Résumé

L'Afrique regorge d'importantes ressources minières dont l'exploitation est jusqu'ici entachée d'importantes pressions sur l'environnement, avec pour corollaire des dommages énormes. Une des raisons de la recrudescence des impacts environnementaux dans l'exploitation des mines Africaines, serait la prééminence accordée aux performances économiques, au détriment des performances environnementales et sociales, par les principaux acteurs. Cependant, la mise en œuvre du concept de développement durable passe par la maîtrise des outils de gestion de l'environnement à l'instar de l'analyse de cycle de vie et de l'analyse multicritère.

Notre travail avait pour but d'envisager une combinaison de l'analyse de cycle de vie et de l'analyse multicritère pour une évaluation des performances environnementales d'une mine de fer. L'analyse de cycle de vie nous a permis de déterminer les points critiques du point de vue environnemental de l'exploitation minière, objet du cas étudié. Les impacts environnementaux retenus pour cette analyse sont : le potentiel de réchauffement global, la toxicité humaine, l'eutrophisation, l'acidification, le potentiel de formation de l'ozone troposphérique et l'écotoxicité terrestre. L'Analyse Multicritère a permis de mettre en œuvre une démarche de prise de décision concernant le type d'émissions sur lesquelles l'entreprise a intérêt à investir pour limiter ses impacts sur l'environnement. Cette prise de décision s'est appuyée sur l'importance accordée aux impacts les uns par rapport aux autres, ce aux échelles globale, locale et régionale.

Il en résulte que, dans une perspective globale l'entreprise gagnerait à réduire principalement ses émissions de gaz à effet de serre et accessoirement, les émissions qui contribuent à la toxicité humaine. A l'échelle régionale par contre, la priorité est accordée à la réduction des émissions responsables de la toxicité humaine. A l'échelle locale par ailleurs, l'entreprise doit se focaliser sur les émissions à l'origine de l'augmentation du potentiel de toxicité humaine du milieu. En revanche, si les impacts ont le même poids, l'importance est accordée à la réduction des émissions susceptibles de contribuer à la toxicité humaine et au réchauffement global.

Des mesures proactives ont été proposées en faveur de la maîtrise des impacts environnementaux que pourraient engendrer l'exploitation industrielle annoncée, des ressources minières camerounaises. Elles s'adressent au gouvernement, aux entreprises minières, aux acteurs non gouvernementaux et se focalisent sur les considérations réglementaires, techniques et communicationnelles.

Mot-clefs

Performances environnementales, Analyse de cycle de vie, Analyse multicritère

Abstract

Africa has an abundance of mineral resources whose exploitation is so far subject to large environmental pressures, not free from huge damages. One reason for the resurgence of environmental impacts in African mining is the pre-eminence given to economic fall-outs at the expense of environmental and social performance by the key stakeholders. However, the implementation of the concept of environmental performance passes through the mastery of environmental management tools such as life cycle and multi-criteria analyses.

Our study intended to consider a combination of life cycle analysis and multi-criteria analysis in assessing the environmental performance of an iron mine. In this combination, life cycle assessment allowed us to identify critical points in the environmental point of view of mining, which is the subject of the present case study. The environmental impacts identified for this analysis are: the global warming potential, human toxicity, eutrophication, acidification, the potential formation of tropospheric ozone and terrestrial ecotoxicity.

The multi-criteria analysis enabled the implementation of a decision making process with regards to the type of emission the company would gain if she invests to curb down. This decision was based on the importance given to each impact in comparison to the others; their global, regional and local scales. The end result of these combined analysis shows that in a global perspective the company would benefit mainly by curbing down its greenhouse gases emissions and if need be, emissions that contribute to human toxicity.

On the contrary, at the regional scale, priority is given to the reduction of the emissions that account for human toxicity, followed by the emission of greenhouse gases and emissions responsible for increasing the potential for soil acidification. At the local scale hereafter, the company's investment in reducing its environmental impact should focus on emissions that account for the increase of the human toxicity of the environment potential. However, if the impacts are equally important, priority is given to reducing emissions that may contribute to both human toxicity and global warming.

Following these results, proactive measures have been proposed for controlling environmental impacts that could result from the industrial exploitation of Cameroonian mineral resources. These measures are aimed particularly at government, mining companies and nongovernmental stakeholders. They focus on regulatory, technical and communicational frameworks.

Keywords:

Environmental performance, Life cycle assessment, Multicriteria analysis.

Liste des acronymes et abréviations utilisés

ACV:	Analyse de Cycle de Vie
AHP :	Analytic Hierarchy Process
AMC:	Analyse Multi Critère
AP :	Acidification Potential
BAD :	Banque Africaine de Développement
CAFE :	Clean Air For Europ
CITEPA:	Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique
CMED :	Conférence Mondiale sur l'Environnement et le Développement
CML :	Institute Of Environmental Sciences
CNUCED:	Conférence des Nations Unies sur le Commerce et le Développement
COV:	Composés Organiques Volatils
CRIIRAD :	Commission de Recherche et d'Information Indépendante sur la Radioactivité
DBO :	Demande Biologique en Oxygène
DCO :	Demande Chimique en Oxygène
DSCE :	Document Stratégique de Croissance et de l'Emploi
EIE :	Etude d'Impact Environnemental
EP:	Eutrophication Potential
FEE :	Flux Elémentaire Entrant
FES :	Flux Elémentaire Sortant
FFEM :	Fonds Français pour l'Environnement Mondial
FPI :	Flux de Produit Intermédiaire
GES :	Gaz à Effet de Serre
GIEC :	Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
GWP :	Global Warming Potential
HTP :	Human Toxicity Potential
ICE :	Indicateur de Condition Environnementale
INPL :	Institut National Polytechnique de Lorraine
IPCC :	International Panel on Climate Change
IPE :	Indicateur de Performance Environnementale
IPM :	Indicateur de Performance de Management
IPO :	Indicateur de Performance Opérationnelle
ISO :	International Organisation for Standardisation
LYCIMIN :	Life Cycle of Mines
MES	Matières En Suspension
MINIMIDT :	Ministère des Mines, de Développement Industriel et Technologique
MIT :	Massachussets Institute Of Technology
OCDE :	Organisation de Coopération et de Développement Economique
ONG :	Organisation Non Gouvernementale
PAN :	Peroxy Acetyl Nitrate
PCB :	PolyChloroBiphénile
PCDD :	PolyChloroDibenzo - P - Dioxine
PCDF :	PolyChloroDibenzo Furane
PIB	Produit Intérieur Brut
PM ₁₀	Particules de diamètre Moyen 10µm
PNGE :	Plan National de Gestion de l'Environnement
POF:	Photochemical Ozone Formation

RSE :	Responsabilité Sociétale de l'Entreprise
S. M.E :	Système de Management Environnemental
SETAC :	Society Of Environmental Toxicology And Chemistry
Ter. Ec:	Terrestrial Ecotoxicity
UF :	Unité Fonctionnelle
UN :	Nations Unies
UNFCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
UV :	Ultra Violet

Sommaire

Remerciements.....	i
Dédicace.....	ii
Résumé.....	iii
Abstract.....	iv
Liste des acronymes et abréviations utilisés.....	vi
Introduction.....	4
1 Problématique dans le cadre du projet professionnel.....	7
1.1 Description générale et aperçu de l'activité minière en Afrique.....	7
1.1.1 Développement et environnement.....	7
1.1.2 Environnement et développement durable.....	7
1.1.3 Le secteur minier et le développement.....	9
1.1.4 Rappels sur quelques impacts environnementaux et sociaux des activités minières sur le continent.....	10
1.2 Importance du sujet et énoncé des questions soulevées.....	12
1.2.1 Importance du sujet.....	12
1.2.2 Enoncé des questions soulevées.....	12
1.3 Synthèse des données.....	13
1.4 Résultats attendus.....	13
2 Revue bibliographique.....	14
2.1 Le concept de « performance environnementale ».....	14
2.1.1 Définition du concept.....	14
2.1.2 Les outils de mesure de la performance environnementale.....	15
2.2 Généralités sur l'exploitation minière, la notion d'impact environnemental et les différentes échelles de caractérisation.....	17
2.2.1 Présentation d'une exploitation minière.....	17
2.2.2 L'impact environnemental.....	18
2.2.3 Les différentes échelles de caractérisation des impacts.....	18
2.3 Quelques outils de mise en œuvre du développement durable en entreprise.....	23
2.3.1 L'analyse de cycle de vie et ses approches.....	23
2.3.2 Quelques usages de l'ACV.....	25
2.3.3 L'ACV et quelques outils de management environnemental.....	27
3 Cadre méthodologique.....	30
3.1 L'analyse de cycle de vie.....	30

3.1.1	La définition des objectifs et du système	31
3.1.2	Inventaire des émissions et extractions	32
3.1.3	L'analyse de l'impact	32
3.2	L'analyse des impacts au moyen de l'analyse multicritère	33
3.2.1	La détermination des critères et des options	33
3.2.2	L'évaluation comparée des critères et options choisis	34
3.2.3	La détermination des priorités	34
3.2.4	La synthèse des priorités	35
3.2.5	Vérification de la cohérence des jugements	35
3.2.6	Analyse et interprétation des résultats	35
4	APPLICATION A L'EXPLOITATION D'UNE MINE DE FER ET PERSPECTIVES POUR L'EXPLOITATION MINIERE AU CAMEROUN	37
4.1	Analyse des performances environnementales d'une exploitation minière : cas d'une mine de fer	37
4.1.1	Analyse du cycle de vie d'une mine de fer	37
4.2	Optimisation de la prise de décision au moyen de l'analyse multicritère	43
4.2.1	Détermination des critères et des options	43
4.2.2	Evaluation comparée des critères et options, détermination des priorités	44
4.2.3	Synthèses des priorités, Choix des options et interprétations	45
4.2.4	Détermination de la cohérence des résultats	46
4.3	Proposition de mesures en faveur de la protection de l'environnement en contexte minier au Cameroun	46
4.3.1	Au niveau gouvernemental	47
4.3.2	Au niveau des entreprises minières	47
4.3.3	Au niveau des acteurs non gouvernementaux	47
	Conclusion générale	53
5	Références bibliographiques	56
6	Liste des illustrations	60
7	Liste des tableaux	61
8	Glossaire	62
9	Annexes	63
9.1	Cadre juridique et institutionnel de l'exploitation minière au Cameroun	63
9.1.1	Au niveau national	63
9.1.2	Au niveau international	64
9.1.3	Le cadre institutionnel	64
9.2	Le Cameroun, ses ressources minières et les permis attribués	65

9.2.1	Présentation du Cameroun	65
9.2.2	Le potentiel minier Camerounais et les activités minières.....	65
9.2.2.3	Les activités minières	68
9.3	Apport du stage dans l'appropriation de la méthodologie	69
9.3.1	Revue de la bibliographie et définition du système	70
9.3.2	La conception des arbres à processus.....	70
9.3.3	Implémentation du système sous Gabi 4	71
9.3.4	Le calcul des bilans Intrants/Extrants du système.....	74
9.3.5	Tracé des diagrammes et interprétation des résultats	75

Introduction

Le développement économique des peuples africains se heurte à de nombreux problèmes qui limitent leur capacité à réduire la pauvreté et menacent dangereusement les écosystèmes par les pollutions diverses qu'il pourrait engendrer. L'Afrique d'aujourd'hui a entamé une marche assez fulgurante sur le chemin du développement et de la croissance. Elle a enregistré un taux de croissance assez élevé en 2004 (5,1%) par rapport à son niveau de 1996 (3,6%) (BAD, 2005). Ceci se traduit par une industrialisation de plus en plus accrue basée sur les ressources naturelles et entachée par la déforestation, l'urbanisation, la tendance à la consommation de masse et la forte augmentation des besoins énergétiques entre autres.

Cependant, toute la planète s'accorde aujourd'hui sur la nécessité de repenser le mode de développement et d'évoluer vers un modèle plus respectueux de l'environnement, reconnu comme étant durable. Le développement durable dont il est question, se présente comme « un processus de changement par lequel l'exploitation des ressources, l'orientation des investissements, des changements techniques et institutionnels se trouvent en harmonie et renforcent le potentiel actuel et futur de satisfaction des besoins des hommes » (CMED, 1988). Dans cette optique, plusieurs engagements à l'échelle internationale en termes d'accords multilatéraux pour la protection de l'environnement ont vu le jour et sont repris par les états Africains qui, les traduisent progressivement en actions concrètes. Ces dernières devraient également s'attaquer au secteur industriel qui, parmi les activités humaines, est de plus en plus reconnu comme le principal moteur du déséquilibre écologique dont la planète est victime aujourd'hui. Les industries devraient dans cette logique non seulement réduire de façon ponctuelle leurs émissions et rejets, mais s'inscrire dans une perspective de conciliation de leur prospérité économique avec les performances environnementales de leurs activités.

La performance environnementale d'une entreprise constitue un indicateur de la prise en compte effective par celle-ci, des mesures de protection de l'environnement en phase avec ses activités. Selon le dictionnaire du développement durable (Brodhag et al., 2007), les performances environnementales d'une entreprise se traduisent par l'« ensemble des résultats obtenus par la direction d'un organisme concernant ses aspects environnementaux ». L'inscription des entreprises exerçant leurs activités à l'échelle d'un territoire ou d'une nation, dans une logique de prise en compte des aspects environnementaux dans leurs activités, doit dans une certaine mesure avoir pour motivation, la réglementation en vigueur ainsi que des dispositifs efficaces de sa mise en œuvre. A l'échelle des entreprises, l'intégration du concept de performance environnementale passe nécessairement par des engagements et des actions concrètes pouvant être englobés dans un système dit de management environnemental. Ce dernier par contre, constitue un engagement de l'entreprise à mener ses activités de façon coordonnée pour contrôler et orienter sa politique en matière d'environnement. Les acteurs non gouvernementaux dont on reconnaît la majorité des pressions à l'origine de la prise en compte des

questions d'environnement par les politiques et les entreprises, doivent également rester vigilantes et jouer véritablement leur rôle sur le continent africain.

S'il est aujourd'hui admis que la notion de performance environnementale et surtout de conciliation des activités humaines avec la protection de l'environnement, a trouvé un écho très favorable dans les politiques et les industries des pays du nord, nous devons reconnaître que le continent Africain et particulièrement l'Afrique au sud du Sahara, reste encore à la traîne lorsqu'on observe les impacts environnementaux engendrés par les activités industrielles qui s'y déroulent. Cela serait liée non seulement à la flexibilité des réglementations et au défaut de leur mise en œuvre, à la non maîtrise des aspects plus ou moins techniques de la protection de l'environnement, mais aussi et surtout au manque de promotion et d'appropriation des outils de mise en œuvre de développement durable à l'instar de l'Analyse de Cycle de Vie et de l'Analyse Multicritère.

C'est au regard de ce retard des pays africains en général et du Cameroun en particulier en matière de mise en œuvre et d'appropriation des outils du développement durable, que nous nous sommes intéressé au cas des entreprises du secteur minier Camerounais qui s'engageront d'ici peu dans l'exploitation des ressources minières à l'échelle industrielle. Cet intérêt se traduit par le choix du thème intitulé « Contribution à l'évaluation des performances environnementales des entreprises minières : perspectives pour les entreprises minières Camerounaises ». Cette formulation du sujet trouve son importance dans la quête d'une attitude pro active et de l'acquisition des outils, méthodes et concepts pouvant permettre d'agir avec efficacité comme acteur, dans la résolution des grandes problématiques environnementales dans l'ensemble, et de celles du secteur minier en particulier. Le choix du secteur minier comme champ d'étude se justifie par notre souci de concilier notre formation actuelle en gestion de l'environnement, avec celle de géologue qui constitue la base, afin de mettre cette dernière au service d'une bonne compréhension des activités qui se déroulent à l'échelle d'une exploitation minière industrielle pour une meilleure maîtrise de leurs impacts potentiels.

Pour proposer des mesures concrètes et réalistes, dans le sens d'une meilleure gestion de l'environnement en contexte minier au Cameroun, nous nous sommes posé la question : comment combiner l'Analyse de Cycle de vie (ACV) et l'Analyse Multicritère (AMC) pour une meilleure évaluation des impacts environnementaux et une bonne prise de décision en matière d'environnement dans le cadre des activités des entreprises minières? La réponse à cette question qui constitue la toile de fond de notre travail, s'appuie sur l'étude de cas d'une exploitation minière orientée vers la production du minerai de fer brut. Pour aborder cette étude de cas, nous nous sommes également appuyés sur les méthodologies et les normes associées à l'ACV et à l'AMC. L'Analyse de Cycle de Vie permet de déterminer de façon quantifiée les impacts environnementaux potentiels du cas étudié dans une approche cycle de vie, alors que l'analyse multicritère débouche sur une prise de décision éclairée relative au choix du type de pollutions à enrayer ou à limiter. Les résultats obtenus à partir de cette démarche, permettent d'envisager des perspectives pour une exploitation industrielle durable des ressources minières camerounaises, en intégrant l'usage de l'ACV et de l'AMC.

Ainsi, notre étude s'articule autour de quatre grands chapitres :

- La définition de la problématique qui revient sur la notion du développement durable et ses rapports avec l'exploitation minière, le cadrage et l'importance du sujet, avec à la clé la présentation des résultats attendus ;
- Le chapitre deux consacré à la revue de la littérature s'appesantit sur le concept de performance environnementale, la notion d'impact environnemental et les différentes échelles de perception des dommages, les applications de l'ACV et ses relations avec le développement durable, le management environnemental et l'Analyse Multicritère ;
- Le chapitre trois décrit la méthodologie de l'étude qui s'inspire des acquis du stage de mise en situation professionnelle et des cadres méthodologiques de l'ACV et de l'AMC ;
- Le chapitre quatre fait état de l'étude de cas qui débouche sur la présentation, l'analyse et l'interprétation des résultats. Le point culminant de cette étude est la proposition d'un cadre logique de mise en œuvre des mesures au niveau gouvernemental, au niveau des entreprises minières qui entreront en activité dans l'avenir et enfin, au niveau des populations locales et des organisations de la société civile.

1 Problématique dans le cadre du projet professionnel

Le développement des peuples est fondé sur les ressources dont ils disposent. Inconscientes des problèmes que peut engendrer l'utilisation à outrance des ressources naturelles, les sociétés ont brillé à une époque de leur histoire par la recherche effrénée de la croissance. L'exploitation des ressources minières a ainsi d'une part contribué pendant des siècles à l'essor économique des pays dits développés, mais occasionné d'importants dégâts du point de vue environnemental d'autre part. Au 21^{ème} siècle par ailleurs, la prospérité économique doit rimer avec la protection de l'environnement et l'équité sociale.

1.1 Description générale et aperçu de l'activité minière en Afrique

1.1.1 Développement et environnement

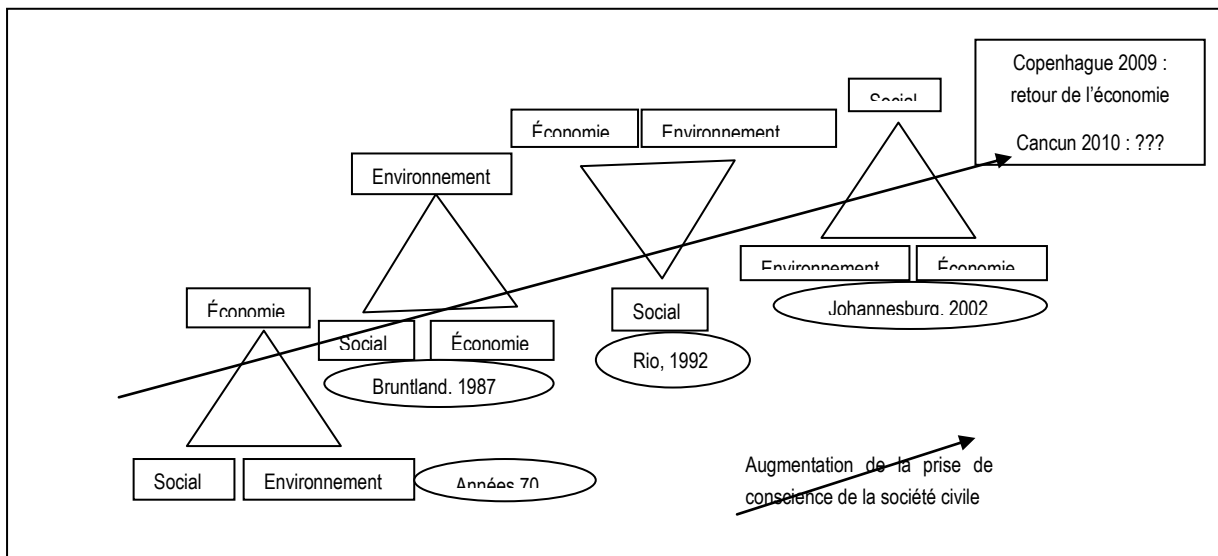
Le modèle productiviste et consumériste qui a caractérisé les sociétés capitalistes et la révolution industrielle entre le 15^e et le 17^e siècle et qui a vécu sa période de gloire dans les années 60, a tendance jusqu'à nos jours à dominer le développement planétaire. Ceci se conjugue avec l'intensification des activités industrielles, la demande croissante des biens et des services et la croissance démographique. S'il est vrai que cette forte production des biens et services à travers les activités industrielles s'inscrit dans le souci permanent qu'a la société, de satisfaire les besoins de l'humanité afin de garantir son bien être, nous ne devons pas perdre de vue le fait que cette forme de développement est considérée aujourd'hui comme le principal responsable des impacts environnementaux qu'on observe sur la planète. Ceux-ci se traduisent principalement par la dégradation des ressources naturelles, la multiplication de la sécheresse, le changement climatique, la multiplication des maladies entre autres. Il a été démontré au cours des dernières décennies que la compétitivité à long terme des industries n'est possible que si elles arrivent à intégrer dans leurs outils d'aide à la décision les questions environnementales et sociales (Hau, 2002, cité dans Mehdi, 2008). Ce courant de pensées rejoint celui du développement durable et renforce encore à l'évidence, la nécessité sans cesse croissante pour les peuples et les nations d'épouser un développement intégré, celui qui concilie la prospérité économique à la protection de l'environnement et à l'équité sociale.

1.1.2 Environnement et développement durable

Le développement durable prend naissance dès les années 70 suite à des réflexions sur un projet de société mettant en relation les hommes et les écosystèmes. Le développement durable est apparu au plan international dans la stratégie mondiale de conservation de la nature et des ressources de 1980 comme alternative au concept de l'écodéveloppement (Belem et al., 2005). La marche vers le développement durable ne s'est pas faite sans difficultés. Selon Weber (2002), les années 70 ont été

marquées par le développement économique à outrance au détriment des enjeux sociaux et environnementaux. Les travaux de la commission Brundtland (1987) ont permis de relever et d'identifier les problèmes environnementaux qui constituent une menace pour la survie de la planète. Ceux-ci tournent autour de la forte croissance démographique, des perturbations climatiques favorisées par la perte du couvert végétal, la course effrénée vers les richesses, avec pour corollaire l'utilisation démesurée des ressources naturelles et l'augmentation des pollutions. C'est à partir de ces travaux qu'on est arrivé à une définition globale du développement durable à savoir : <<Un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs>>(CMED,1987). Elle traduit ainsi la nécessité de prendre en compte les questions environnementales et sociales dans les stratégies de développement. Ce concept suscitera l'organisation à Rio de Janeiro en 1992 et sous l'égide des Nations Unies, du sommet de la terre qui marquera la volonté de toutes les nations de mettre au cœur du développement les questions relatives à l'environnement. Cependant ce sommet place sur la même échelle de valeur les questions économiques et les questions environnementales tout en reléguant au troisième plan les aspects sociaux du développement. Mais le sommet de Johannesburg permettra de mettre en relief l'importance du social dans le développement durable (Figure 1). Toutefois nous constatons que tous les efforts allant dans le sens d'enrayer la forte antinomie du tryptique environnement - social - économie, ne permettent pas toujours d'avoir l'effet escompté. Ceci est observé à travers les récentes négociations sur le climat qui ont tendance à accorder plus de privilège à la variante économique du développement, ce malgré les évolutions observées à la dernière conférence des parties de Cancun¹.

Figure 1 Du développement au développement durable : évolution de la hiérarchie des enjeux



Source : Weber, 2002, cité dans Torquebiau, 2010

¹ La conférence de Cancun a été marquée par le retour des questions relatives à la protection de l'environnement. Cette conférence a permis d'envisager l'élargissement des instruments de marchés mis en place par le protocole de Kyoto, la création d'un fond vert financé par les pays développés pour gérer l'adaptation aux changements climatiques dans les pays sous développés et la création d'un nouveau mécanisme de lutte contre la déforestation (UNFCCC, 2010).

En Afrique subsaharienne en général et au Cameroun en particulier, la prise de conscience de l'urgence d'intégrer le concept de développement durable dans toutes les stratégies de développement découle des évolutions observées au niveau international en matière de protection d'environnement. Le Cameroun a ainsi adhéré à de nombreux accords multilatéraux en matière d'environnement et engagé la mise en place des mesures réglementaires et institutionnelles, favorables à la prise en compte de l'environnement dans les projets de développement (Annexe 9.1).

Le nouveau millénaire marque le début d'une renaissance politique, économique et environnementale en Afrique (PNUÉ, 2006). Les ressources naturelles de l'Afrique constituent un important levier de son développement et de l'amélioration du bien être de ses populations encore en proie à plusieurs calamités sociales. Cependant afin que cet atout soit effectivement mis à profit, il demeure important pour l'Afrique d'agir pour protéger non seulement ses ressources mais aussi les exploiter durablement. Parmi les secteurs considérés comme importants pour le développement économique de l'Afrique, le secteur minier occupe une place de choix.

1.1.3 Le secteur minier et le développement

L'Afrique est un continent qui regorge d'importantes ressources minières variées, qui contribuent à la diversification de ses activités économiques et industrielles. Elle recèle les plus importantes réserves du monde en ce qui concerne le platine, l'or, les diamants, la chromite, le manganèse et le vanadium (Tableau1). Il faut noter également que ces estimations sont en deçà du potentiel réel au regard d'un manque important de données sur la géologie du continent. Cependant, du fait du manque de financements propres, les pays Africains sont incapables de les exploiter eux-mêmes (Khennas, 1993).

Tableau 1 Principales ressources minières de l'Afrique en 2005

Minerai	Platine	Phosphate	Or	Chrome	Manganèse	Vanadium	Cobalt	Diamant	Aluminium
A (%)	54	27	20	40	28	51	18	78	4
Rang	1	1	1	1	2	1	1	1	7
B (%)	60	66	42	44	82	95	55	88	45
Rang	1	1	1	1	1	1	1	1	1

A=Part de l'Afrique dans la production mondiale (pourcentage), B=Part de l'Afrique dans les réserves mondiales (Pourcentage)

Source : Nations Unies, 2009

C'est la raison pour laquelle l'exploitation minière incombe aux sociétés étrangères qui créent une part de richesses qui profite peu aux états Africains. Cette exploitation alimente comme pendant la période coloniale les économies occidentales, et ne bénéficie pour la plupart des cas d'aucune attention sur la protection de l'environnement. Selon Réveret (2006), le secteur minier n'a obtenu de bonnes notes ni pour ses relations avec les communautés locales, ni pour ses performances dans le domaine de l'environnement dans les dernières décennies. La recherche du gain par les entreprises minières et le souci des Etats Africains d'augmenter leur croissance économique à travers les activités minières ont

eu pour résultats des impacts environnementaux et sociaux négatifs. Malgré le fait que les ressources minières soient non durables, il convient de leur assurer une certaine durabilité grâce aux liens que le secteur minier entretient avec les autres secteurs de l'économie (Nations Unies, 2009).

Bien que les exigences environnementales et sociales en matière d'exploitation minière occupent une place importante dans les législations nationales, on note toujours des effets néfastes des activités minières sur l'environnement, qui se conjuguent avec la dégradation des valeurs sociales et locales (Nations Unies, 2009). Ceci suscite un sentiment d'échec de la mise en œuvre des mesures de protection de l'environnement dans les activités minières. Ce constat peut être appuyé par le regard critique que l'on peut se permettre de porter sur les activités minières et leurs impacts environnementaux et sociaux, enregistrés au cours des dernières années dans certains pays d'Afrique au sud du Sahara parmi lesquels le Niger et le Gabon, comme rappelé ci-après.

1.1.4 Rappels sur quelques impacts environnementaux et sociaux des activités minières sur le continent

1.1.4.1 L'exploitation de l'uranium au Niger

L'exploitation de l'Uranium au Niger est au cœur de plusieurs débats depuis l'installation dans les années 60 des sociétés minières spécialisées en la matière. L'extraction de l'Uranium est une opération à risques puisqu'elle conduit à manipuler des substances radioactives. Lorsque des précautions ne sont pas prises, il peut y avoir une augmentation de la radioactivité de l'environnement (eau, sol, air, faune et flore). Les résultats des études conduites en France et rendues publiques par la Commission de Recherche et d'Information Indépendante sur la Radioactivité (CRIIRAD) en collaboration avec l'Organisation Non Gouvernementale (ONG) internationale Greenpeace, montrent clairement l'impact de l'exploitation de l'Uranium sur l'environnement. Force a été de constater qu'à travers cette étude tous les sites miniers contrôlés au Niger ont toujours présenté une situation radiologique anormale (CRIIRAD & Greenpeace, 2010). Ce rapport d'étude d'impact de l'exploitation des mines d'Uranium montre que, dans le cadre de leurs activités, les compagnies minières laissent des matières radioactives solides (boues, sols) dans l'environnement accessible à la population et que cette situation ne fait que perdurer malgré toutes les allégations faites à leur endroit. Ce rejet des produits miniers dans l'environnement entraîne des contaminations et des pollutions significatives dues aux éléments radioactifs. Les conséquences observées au cours de la dernière décennie sont le recul des espaces forestiers avec une diminution de la disponibilité en bois utilisé comme source d'énergie par les populations, la rareté des pâturages, la contamination des eaux et la recrudescence des maladies atypiques observées dans la région. Ce rapport permet de relever que l'exploitation de l'Uranium au Niger est à l'origine de l'assèchement et de la pollution des nappes d'eau souterraines par la surexploitation industrielle et le déplacement des millions de tonnes de roches et de terre, la dégradation de la flore et la perte des pâturages, ainsi que l'accroissement des probabilités d'exposition des populations aux maladies, notamment le cancer. Au regard des éléments ci-dessus, on peut penser que l'exploitation minière dans cette zone du continent constitue plutôt une source de dégradation

croissante de l'environnement par la pollution qu'elle génère, une source de destruction et d'épuisement des ressources non renouvelables que constituent les gisements d'uranium et enfin un moteur d'appauvrissement croissant. Ce qui va contre les attentes escomptées de développement au regard de l'importance des gisements.

1.1.4.2 L'exploitation minière au Gabon

Le Gabon, pays de l'Afrique Centrale, regorge de plusieurs ressources naturelles parmi lesquelles les ressources minières. Dans l'une des provinces du pays (Haut-Ogoue), on note une importante activité minière caractérisée par l'exploitation industrielle des mines d'Uranium et de Manganèse depuis les années 60.

Le rapport 2010 de l'ONG internationale Brainforest sur l'impact de l'exploitation minière sur l'environnement dans le Haut-Ogoue fait état d'un déversement permanent depuis une quarantaine d'années, des résidus miniers d'uranium dans les cours d'eau avoisinants la carrière d'uranium de Mounana. Ces déversements sont à l'origine de plusieurs problèmes sanitaires observés dans la région. Il est à noter selon ce rapport la persistance du problème de gestion des résidus miniers malgré l'arrêt des activités, ce qui constitue un véritable problème environnemental pour les riverains étant donné la permanence de leur radioactivité. On note également un manque d'information des populations avoisinantes sur les risques auxquels elles sont exposées et sur les substances radioactives réputées dangereuses et susceptibles de contaminer les eaux, les sols, les aliments et l'air.

D'autre part, dans le rapport de Brainforest, Lebas relève les impacts de l'exploitation des minerais de manganèse dans la région de Moanda (Lebas, Août 2010). Cette activité qui date d'une cinquantaine d'années est marquée par le rejet des déchets miniers dans les rivières qui jouxtent la mine. Ces déchets sont essentiellement constitués des boues, des résidus solides et des stériles stockés.

D'une manière générale, l'impact de l'exploitation de l'Uranium et du Manganèse sur l'environnement selon l'ONG Brainforest, peut se résumer autour des éléments suivants :

- la dégradation de l'état de santé des anciens employés des mines d'uranium et des populations locales, qui serait liée à leur exposition aux radiations selon une expertise du CRIIRAD de 2003 ;
- la persistance jusqu'à nos jours des radiations sur les anciens sites d'exploitation d'uranium traduisant une forte dégradation de l'environnement et une exposition de la flore, de la faune, de l'eau et des populations aux contaminations radioactives ;
- l'ensablement et la pollution des fleuves et rivières par d'importants déchets et résidus issus de l'exploitation du manganèse avec pour corollaire la dégradation de la qualité des eaux et la destruction de l'ichtyofaune, la destruction des vastes étendues vouées autrefois à l'agriculture et la dégradation des écosystèmes en général ;
- la pauvreté remarquable des populations avoisinantes des sites miniers malgré des décennies d'exploitation qui a créé une richesse qui n'a pourtant pas profité aux populations locales

1.2 Importance du sujet et énoncé des questions soulevées

1.2.1 Importance du sujet

Au regard de l'histoire des activités minières qui se sont développées sur le continent et des leçons tirées des exemples précédents, on est en droit d'affirmer que l'exploitation minière en Afrique a toujours rimé avec la dégradation de l'environnement et la dégradation de l'état de santé des populations. L'ensemble de ces dommages est couronné par l'installation après fermeture des mines, d'une persistance des pollutions, de la dégradation des écosystèmes et d'une pauvreté locale caractérisée, ceci malgré l'évolution observée des réglementations en matière d'environnement. Cela est paradoxal dans la mesure où la production des richesses à travers l'exploitation minière devrait plutôt constituer un levier incontournable du développement des pays africains qui ne disposent pas d'une économie diversifiée. Dès lors, il convient pour le Cameroun, qui aujourd'hui compte énormément sur ses ressources minières (Annexe 9.2) pour renforcer son tissu industriel et accroître son Produit Intérieur Brut (PIB), de tirer les leçons des activités minières passées sur le continent pour en concilier l'aspect environnemental et social. Ceci passe par l'appropriation non seulement par les entreprises minières, mais aussi par le gouvernement et la société civile, des stratégies objectives de lutte contre les pollutions et les impacts environnementaux engendrés par ces activités. Pour cela il devient important d'acquérir de façon pratique les connaissances liées à des outils de gestion de l'environnement à l'échelle des sites, ainsi que leur mise en œuvre pour contribuer à des prises de décision éclairées tant au sein des entreprises que dans les hautes sphères des administrations gouvernementales. C'est donc dans le souci d'apporter une contribution à la gestion des problématiques environnementales du secteur minier camerounais, que s'est opéré le choix du thème de ce mémoire. Ce dernier suscite la recherche des éléments critiques du point de vue environnemental sur lesquels devront s'appuyer toutes les parties concernées, afin d'améliorer les performances environnementales des entreprises minières dont les activités s'intensifieront dans un proche avenir.

1.2.2 Énoncé des questions soulevées

La principale question qui nous vient à l'esprit est : comment combiner l'analyse de cycle de vie et l'analyse multicritère pour évaluer les impacts environnementaux susceptibles de survenir dans les activités d'une exploitation minière ? Cette question engendre des interrogations sous-jacentes à savoir :

- Quels sont les impacts environnementaux que peut engendrer une exploitation minière de façon globale ?
- Comment analyser ces impacts à différentes échelles locale, régionale et globale ?
- Quelles mesures préconiser pour atténuer ces impacts ?
- Quelles leçons tirer pour une exploitation minière plus ou moins saine des mines camerounaises ?

1.3 Synthèse des données

La réponse à ces préoccupations, réside dans l'analyse des documents qui traitent des évaluations des performances environnementales au moyen de la multitude d'outils qui existent. Nos réflexions s'appuieront sur les aspects méthodologiques de l'analyse de cycle de vie, de l'analyse multicritère et du management environnemental en entreprise. L'utilisation de l'analyse de cycle de vie comme outil d'évaluation des performances environnementales d'une entreprise sera fondée sur la norme ISO14031. Les éléments qui rappellent le management environnemental en entreprise seront extraits de la norme ISO14001. L'étude s'appuiera aussi sur les exemples de combinaisons d'outils d'évaluations des performances environnementales utilisées dans le cas d'autres entreprises. Les données relatives à l'exploitation minière qui fera l'objet du cas traité dans ce mémoire sont essentiellement tirées de la littérature disponible, ainsi que de la base de données du logiciel d'ACV Gabi 4. L'établissement de l'arbre à processus du système de production du minerai sera fait à partir des données de la littérature disponible.

1.4 Résultats attendus

Partant de l'hypothèse selon laquelle, la dégradation de l'environnement minier dans les pays du sud est attribuable à un déficit en matière d'appropriation et de mise en œuvre des outils de gestion de l'environnement disponibles, nous comptons établir au moyen de l'ACV et de l'AMC, les performances environnementales globales d'une entreprise minière à partir du cas théorique d'une exploitation de minerai de fer. De manière spécifique, il sera question de ressortir les impacts environnementaux potentiels de l'exploitation minière objet du cas étudié, ainsi que leur importance à l'échelle locale, régionale et globale. Des leçons seront dégagées, en vue de promouvoir une meilleure prise en compte des questions environnementales dans les entreprises minières camerounaises en pleine expansion. Par ailleurs, l'obtention de ces résultats nécessite de prime abord, une revue de la documentation disponible sur les questions relatives à la performance environnementale, à l'analyse de cycle de vie et à l'analyse multicritère.

2 Revue bibliographique

L'évaluation des performances environnementales d'une organisation nécessite la maîtrise d'un ensemble d'outils. L'analyse de cycle de vie se positionne aujourd'hui comme l'outil par excellence d'évaluation des performances environnementales des entreprises. Ainsi, plusieurs études ont été menées dans les entreprises minières en s'appuyant sur l'ACV pour déterminer les impacts de leurs activités sur l'environnement. Cependant la prise de décision par rapport aux actions prioritaires n'est pas toujours évidente au moyen des résultats de l'ACV. C'est pourquoi il devient important d'associer l'ACV à d'autres outils dont l'AMC, pour une prise de décision éclairée intégrant l'échelle spatio-temporelle dans laquelle on se situe. Avant de revenir sur ces aspects, il convient de présenter de prime abord le concept de performance environnementale.

2.1 Le concept de « performance environnementale »

2.1.1 Définition du concept

La notion de performance environnementale est jusqu'ici difficile à cerner au regard des multiples interprétations dont elle est sujette. Dans les pays du nord, cette notion est assez répandue. Son intégration dans les organisations date de plus d'une dizaine d'années. Elle est attribuable à la montée des exigences réglementaires et sociales, à l'apparition des concepts tels que la Responsabilité Sociétale de l'Entreprise (RSE), ainsi qu'au souci des organisations d'améliorer leur image, en matière d'environnement (Renaud, 2009). Cette intégration est caractérisée dans la plupart des cas, par la mise en place d'un Système de Management Environnemental (SME) dont le processus est défini dans la norme ISO 14001. Toutefois, si le SME n'est pas mis en place au sein de l'organisation, cette dernière peut s'inspirer du cadre international de l'Evaluation des Performances Environnementales (EPE) établi par l'Organisation des Standards Internationaux (ISO) et reconnu sous la norme ISO 14031, pour identifier ses aspects environnementaux.

La performance environnementale apparaît comme un concept flou, complexe, indéterminé et subjectif, qui suscite diverses interprétations (Janicot, 2007). Selon la norme ISO 14031, la performance environnementale se définit dans le domaine du management environnemental comme étant l'ensemble des « *résultats mesurables du système de management environnemental, en relation avec la maîtrise par l'organisme de ses aspects environnementaux sur la base de ses objectifs et cibles environnementaux* » (ISO 14031, 2000). Cette approche montre que la notion de performance environnementale dépend des engagements de l'entreprise, de ses aspirations ainsi que de ses attentes en matière d'environnement, ce en rapport avec les exigences locales, régionales ou globales auxquelles les parties prenantes et les entreprises sont généralement soumises. D'autre part, à l'analyse, le concept de performance environnementale peut résulter du croisement de deux axes

principaux à savoir : l'axe Interne-Externe et l'axe Processus-Résultats (Tableau 2). Ce croisement fait ressortir quatre principales approches associées au concept de performance environnementale (Henri & Giasson, 2006) dont :

- l'amélioration des produits et processus, c'est-à-dire les avantages concurrentiels que l'entreprise tire de son programme environnemental ;
- la relation avec les parties prenantes, qui traduit l'interaction qui existe entre l'entreprise et les parties prenantes extérieures telles que : les actionnaires, les clients, les fournisseurs, le gouvernement, etc... ;
- la conformité réglementaire et les impacts financiers qui expriment le niveau de mise en œuvre des contraintes réglementaires ainsi que l'impact économique qui en découle, ce en rapport avec le programme environnemental ;
- les impacts environnementaux et l'image de l'entreprise qui traduisent les externalités négatives ainsi que leurs impacts sur l'image de l'entreprise.

Tableau 2 Matrice de la performance environnementale.

Axe Interne-Externe Axe processus-Résultats	Interne	Externe
Processus	Amélioration des produits et processus	Relations avec les parties prenantes
Résultats	Conformité réglementaire et impacts financiers	Impacts environnementaux et image de l'entreprise

Source : Henri & Giasson, 2006

Cependant cette dernière approche de la performance environnementale met quelque peu en marge l'implication réelle des acteurs et relègue au second plan la question de sa qualité globale comme le précisent Caron et ses collaborateurs (2007). Par ailleurs nous devons noter que malgré les contradictions nées de la définition du concept de performance environnementale, sa mise en œuvre nécessite une appropriation des instruments de mesures et l'établissement d'un certain nombre d'indicateurs. Les résultats des mesures doivent faire l'objet d'une évaluation permanente, ce, dans l'optique d'envisager des améliorations éventuelles (Lebas, 1995 ; Bouquin, 2004).

2.1.2 Les outils de mesure de la performance environnementale

En l'absence d'un cadre méthodologique universel d'évaluation et de comparaison des impacts environnementaux, l'évaluation des performances environnementales est vouée aux contestations. Ceci est lié au problème de quantification des questions relatives à l'environnement, qui est assez complexe. La norme ISO 14031 permet ainsi d'harmoniser la mesure des performances environnementales à travers des indicateurs environnementaux, tandis que la norme ISO 14001 propose le système d'audits.

2.1.2.1 Les indicateurs environnementaux

Les indicateurs environnementaux sont des grandeurs mesurables qui permettent de décrire l'état de l'environnement et les impacts observables (Renaud, 2009), d'avoir une idée sur les éléments susceptibles d'engendrer des dommages, de faire le point sur l'état de l'environnement par rapport à un état de référence et aux objectifs de l'entreprise en matière d'environnement (Tyteca, 2002). Ainsi, l'établissement des indicateurs qui s'inscrit en droite ligne dans la politique environnementale de l'entreprise, s'appuie sur la structure de l'entreprise, son fonctionnement et surtout les objectifs définis en matière d'environnement.

a) Caractéristiques d'un indicateur de performance environnementale :

La caractérisation d'un indicateur découle de sa qualité et de sa fonction principale. Il doit permettre d'avoir une image fidèle du phénomène étudié et faciliter l'action (Henri & Giasson, 2006).

Les qualités attribuables à un bon indicateur peuvent se retrouver dans la pertinence, la simplicité, l'objectivité, la sensibilité, la précision, la fidélité, l'auditabilité, la communicabilité et l'acceptabilité.

Par rapport aux fonctions, un bon indicateur devra assurer :

- la mesure du niveau des performances environnementales d'un organisme ;
- le maintien, voire l'amélioration de ce niveau ;
- la détection des problèmes qui peuvent survenir, des non conformités pour améliorer la performance et ;
- l'appréciation du progrès réalisé.

b) Les différents types d'indicateurs

Selon la norme ISO 14031, on distingue deux catégories d'indicateurs environnementaux : les Indicateurs de Performance Environnementale (IPE) et les Indicateurs de Conditions Environnementales (ICE). Les IPE sont subdivisés en Indicateurs de Performance de Management (IPM) qui donnent des informations sur les efforts de l'entreprise en faveur de l'amélioration de ses performances environnementales et les Indicateurs de Performances Opérationnelles (IPO), qui fournissent des informations sur la performance des opérations de l'entreprise.

Par contre les ICE, permettent d'avoir un aperçu de l'état de l'environnement et d'établir une corrélation avec les activités de l'entreprise ou de l'organisation. Ceci contribue à la prise en compte par l'entreprise de l'impact potentiel de ses activités sur l'environnement et allège la planification puis la mise en œuvre de l'évaluation des performances environnementales. Pour cela l'entreprise s'appuie sur des indicateurs préétablis qui peuvent être mondiaux, régionaux ou locaux et relatifs à la qualité de l'air, la qualité de l'eau, la pollution des sols, la biodiversité (flore et faune) et aux êtres humains entre autres. Il faut relever également le fait que l'élaboration des ICE relève des compétences des autorités des agences gouvernementales, des ONG ou des organisations scientifiques (Renaud, 2009).

2.1.2.2 *Les audits environnementaux*

L'audit environnemental d'une entreprise peut être défini comme une évaluation séquentielle, objective, documentée et systématique des systèmes de gestion ainsi que de la performance de la qualité des équipements installés pour protéger l'environnement (Lafontaine, 1988). Sa réalisation facilite le contrôle par la direction de l'entreprise, de ses pratiques en matière d'environnement, de sa conformité par rapport aux dispositions réglementaires. D'autre part les résultats d'un audit environnemental peuvent constituer un instrument d'amélioration de son image auprès des parties prenantes, ce qui implique une amélioration de ses performances économiques. Il se distingue des indicateurs environnementaux par le fait que le processus de mise en œuvre de ce dernier est continu.

Dans le SME (Norme ISO 14001), l'audit environnemental entre dans le processus d'amélioration continue et constitue un des éléments incontournables de son fonctionnement. Il permet de détecter à l'avance les aspects environnementaux qui pourraient entraîner à la longue, des dommages capables d'engendrer des crises.

En dernier ressort, les performances environnementales permettent d'obtenir au niveau de l'organisation un tableau de bord de gestion environnementale dont l'objectif est d'exprimer ses bonnes pratiques environnementales à travers les données chiffrées sous forme d'indicateurs de performance.

2.2 Généralités sur l'exploitation minière, la notion d'impact environnemental et les différentes échelles de caractérisation

2.2.1 *Présentation d'une exploitation minière*

Une exploitation minière est considérée comme l'ensemble des activités et processus coordonnés avec pour objectif l'obtention d'un minerai économiquement rentable. Ceci engendre d'importantes extractions de ressources et des émissions variées, avec pour corollaire des impacts sur l'environnement. On va distinguer deux types d'exploitation minière à savoir les mines à ciel ouvert et les mines souterraines. Selon Durucan et ses collaborateurs (2006), le cycle de vie d'une mine se focalise sur les processus qui s'opèrent au niveau des entités suivantes :

- l'extraction du minerai par les excavateurs qui engendre des déplacements de grandes quantités de roches et de sol ;
- la disposition des résidus solides dans des espaces prévus à cet effet ;
- l'usine de traitement des minerais qui produit également des résidus ;
- l'usine de traitement des eaux de la mine et des eaux issues de l'usine de traitement du minerai ainsi du dispositif de stockage des stériles.

Les activités qui se déroulent au niveau des entités précédentes engendrent des impacts importants sur la ressource en eau, sur l'air et sur le sol, qu'il convient de présenter en fonction des échelles de perception des dommages.

2.2.2 *L'impact environnemental*

L'environnement qui est considéré comme le milieu dans lequel l'on vit, le voisinage d'un élément ou encore l'entourage d'une personne, permet de réunir les éléments naturels et artificiels qui conditionnent la vie sur terre (André et al, 2003). Le code de l'environnement Camerounais (loi N°96/12 du 5 Août 1996 portant loi cadre relative à la gestion de l'environnement du Cameroun), considère l'environnement comme " *l'ensemble des éléments naturels ou artificiels et des équilibres bio-géochimiques auxquels ils participent, ainsi que des facteurs économiques, sociaux et culturels qui favorisent l'existence, la transformation et le développement du milieu, des organismes vivants et des activités humaines*". On parle donc d'impact environnemental lorsque toute activité humaine a tendance à porter atteinte de façon directe ou indirecte aux composantes de l'environnement. Le risque d'impact survient lorsqu'il y a changement d'état de l'environnement suite à une interaction entre un flux anthropique et tout ou une partie de l'environnement (Belhani, 2008).

2.2.3 *Les différentes échelles de caractérisation des impacts*

La caractérisation des impacts environnementaux peut se faire suivant les échelles auxquelles les effets ou les dommages sont perceptibles. L'Organisation de Coopération et de Développement Economique, établit trois échelles d'impacts à savoir l'échelle globale, l'échelle régionale et l'échelle locale (OCDE, 1992). L'échelle globale correspond à la planète terre entière, l'échelle régionale s'étend entre 200 et 1000 km et enfin l'échelle locale couvre des rayons d'actions inférieurs à 50 Km (Khalifa, 2002). Il convient d'analyser dès lors les principaux impacts à prendre en compte lorsqu'on se situe à chacune des échelles.

2.2.3.1 *Les impacts globaux*

Les impacts considérés comme globaux se résument en l'effet de serre, la dégradation de la couche d'ozone et l'épuisement des ressources naturelles.

a) L'effet de serre

L'effet de serre est lié au piégeage dans l'atmosphère et le renvoi vers la surface de la terre et dans toutes les directions, d'une partie de rayonnement solaire dit infrarouge, par des molécules appelées gaz à effet de serre (GES) et des nuages. Ceci a pour conséquence, le réchauffement de la surface de la terre et de la basse atmosphère (GIEC, 2007). Cette modification du climat planétaire liée à l'augmentation des concentrations des GES dans l'atmosphère est imputée selon le GIEC, aux activités humaines. Les principaux GES sont : le dioxyde de carbone (CO₂), la vapeur d'eau (H₂O), les

hydrocarbures halogénés (gaz contenant du fluor, du chlore ou du brome), le protoxyde d'azote (N_2O) et le Méthane (CH_4) (GIEC, 2007).

La lutte contre le changement climatique prend effet en 1997 avec le protocole de Kyoto. L'après Kyoto qui se peaufine à l'horizon suscite déjà de fortes réflexions avec la nécessité sans cesse croissante de prendre des mesures contraignantes à l'endroit des pays en développement dont les émissions représentent 40% des émissions mondiales et qui pourraient selon les estimations, dépasser le niveau des pays riches vers 2025 (Sciama, 2010).

b) Dégradation de la couche d'ozone

Parmi les couches de l'atmosphère, on note la présence de la stratosphère située entre 10 et 60 kilomètres (km) d'altitude et qui renferme la couche d'ozone. L'ozone absorbe la quasi-totalité du rayonnement solaire ultraviolet très dangereux pour les êtres vivants. La destruction de la couche d'ozone est due à la présence dans l'atmosphère des composés chlorés tels que les Chlorofluorocarbones (CFC), les Hydrochlorofluorocarbones (HCFC) (utilisés comme refroidisseurs dans les réfrigérateurs et climatiseurs, solvants, propulseurs aérosols, etc...) et des composés bromés (bromure de méthyle par exemple) ainsi que des halons (gaz d'extinction) (FFEM, 2007). La production de ces gaz est surtout liée aux activités humaines alors que la contribution naturelle liée au chlorure de méthyle produit dans les océans par les algues et les microorganismes est assez faible (FFEM, 2007). La durée de vie de ces composés dans la stratosphère peut atteindre plusieurs dizaines d'années alors que leur action sur la couche d'ozone se produit seulement quelques années après leur émission (FFEM, 2007 ; Belhani, 2008).

La destruction de la couche d'ozone engendre d'importants impacts sur le vivant dont les cancers de la peau, des troubles visuels, la baisse de la résistance des organismes humains à certaines maladies et de l'efficacité de certains vaccins (FFEM, 2007). Sur les plantes cultivées, elle serait à l'origine de la baisse des rendements de certaines céréales et de la diminution des populations de planctons qui constituent des réservoirs de CO_2 atmosphérique (FFEM, 2007). Des mesures visant à protéger la couche d'ozone ont été prises à l'échelle mondiale à travers le protocole de Montréal entré en vigueur en 1989, avec pour objectifs de réduire de 50% entre 1989 et 2000 la production des CFC. Si aujourd'hui les résultats de cet engagement sont satisfaisants avec la possibilité de parvenir à une suppression totale d'ici 2015, on ne devrait pas perdre de vue la lutte contre la production des substituts du CFC dont le HFC, dont l'arrêt total de production est prévue en 2020 pour les pays industrialisés et en 2030 pour les pays en développement.

c) L'épuisement des ressources naturelles

On distingue plusieurs types de ressources naturelles (Belhani, 2008) : les minerais (les métaux), les granulats, les ressources fossiles, les ressources fissiles (uranium, plutonium), les ressources

environnementales (l'air, l'eau, le sol, l'énergie solaire, l'énergie hydraulique), les ressources biologiques (cultures, bois, pêches, ...)

Ces ressources peuvent être regroupées en deux catégories à savoir les ressources épuisables ou non renouvelables appelées ressources abiotiques et les ressources renouvelables ou biotiques. La renouvelabilité d'une ressource est liée à l'échelle spatio-temporelle dans laquelle on se situe (Belhani, 2008). Lorsqu'une ressource dépend d'un stock fini et non reproductible à l'échelle humaine, on parle de ressource non renouvelable. Dans le cas contraire, c'est-à-dire si elle est reproductible dans un avenir prévisible, on parlera plutôt de ressource inépuisable ou renouvelable. Il faut également noter que la consommation exagérée d'une ressource renouvelable et au-delà de sa capacité de renouvellement, pourrait entraîner son épuisement et la rendre non renouvelable. De même, la possibilité de recyclage un nombre infini de fois d'une ressource minière non renouvelable peut rendre celle-ci renouvelable. Compte tenu de la forte demande en ressources naturelles par l'économie mondiale et surtout celle des pays émergents, il est possible dans un avenir proche d'arriver à un épuisement de ces dernières si des mesures tangibles et favorables à leur exploitation rationnelle, ne sont pas prises et effectives. Ceci aura un impact sur le secteur industriel consommateur des ressources naturelles et sur l'économie mondiale.

2.2.3.2. Les impacts régionaux

Sous le vocable d'impacts régionaux, on retrouve les pollutions photochimiques, l'acidification, et l'eutrophisation.

a) Les pollutions photochimiques

La pollution photochimique ou encore pollution photo-oxydante est un ensemble de phénomènes complexes qui conduisent à la formation d'ozone et d'autres composés oxydants (peroxyde d'hydrogène, aldéhydes, Peroxy Acétyl Nitrate ou PAN). Ceci se fait à partir des polluants primaires ou précurseurs dont : les oxydes d'azote, les composés organiques volatils (COV) et de l'énergie apportée par le rayonnement Ultra Violet (UV) solaire. Ce phénomène est attribué aux rejets dans l'air d'hydrocarbures et d'oxydes d'azote d'origine naturelle ou anthropique. Ces phénomènes qui conduisent à la formation de l'ozone qualifié d' "ozone troposphérique", se produisent dans les couches d'air proches du sol (Elichegray et *al.*, 2003). Cet ozone a des effets néfastes sur la santé humaine dont : l'irritation des yeux et des voies respiratoires (Khalifa, 2002), des nausées et des toux (Cooper, 1994) et peut contribuer à la dégradation des végétaux et des matériaux ainsi qu'au phénomène d'effet de serre (Elichegaray et *al.*, 2003). En Europe, la lutte contre la formation de la mauvaise couche d'ozone constitue une des priorités du programme "Clean Air For Europe" (CAFE), en matière de préservation de la qualité de l'air en Europe.

b) Le phénomène d'acidification

La pollution acide (ou pluie acide) est un phénomène régional lié aux polluants acides (SO_2 , NO_x , NH_3 , HCl , HF) émis par les activités humaines. Ceux-ci peuvent retomber en partie à proximité, mais aussi à des centaines, voire des milliers de kilomètres de leurs sources émettrices (CITEPA, 2011). Ces polluants retombent sous forme d'éléments humides (pluies, brouillards, neige, grêle) ou sèches (poussières). On note pendant le transport de ces polluants, la transformation du dioxyde de soufre (SO_2) et des oxydes d'azote (NO_x) en sulfates (SO_4^{2-}) et en nitrates (NO_3^{2-}) au cas où l'atmosphère est sèche. Par contre, si l'atmosphère est humide, ces substances se transformeront en acide sulfurique (H_2SO_4) et en acide nitrique (HNO_3) (CITEPA, 2011).

Les retombées acides ont des impacts sur : les matériaux (corrosion des métaux et dégradation des édifices en pierre) ; les écosystèmes forestiers et les écosystèmes d'eau douce; la végétation par la destruction des tissus biologiques végétaux ; l'acidification des lacs avec pour corollaire la mort des poissons. Ce problème a été pris au sérieux par les pays industrialisés qui ont dû fixer des seuils d'émissions pour les industries, obligeant ainsi ces derniers à prendre des mesures en interne pour enrayer ce fléau.

c) L'eutrophisation

L'eutrophisation correspond à une perturbation de l'équilibre biologique des sols et des eaux due à un excès d'azote et de phosphore d'origine anthropique, ce par rapport à la capacité d'absorption des écosystèmes. Elle est à l'origine de la croissance accélérée de certaines espèces au détriment des autres (Rousseaux, 1998).

Dans les écosystèmes aquatiques à circulation fermée ou réduite (lacs, estuaires, zones côtières), l'eutrophisation est marquée par l'envahissement du milieu par des plantes aquatiques entraînant son appauvrissement en oxygène. Le phosphore et l'azote proviennent principalement des activités industrielles (eaux usées) et agricoles (lixiviation des engrais).

L'eutrophisation provoque la détérioration de la qualité de l'eau et réduit la valeur d'utilisation de l'écosystème aquatique (Jensen et al., 1998). Le manque d'oxygène orchestré par l'eutrophisation entraîne également sous certaines conditions une augmentation des concentrations en fer et en manganèse, qui constituent un véritable problème pour la potabilisation des eaux (Renou, 2006). Sur le compte de l'eutrophisation, il y a également la perturbation du pH du milieu aquatique qui peut devenir très basique ($\text{pH} > 7$), rendant l'ionisation de l'ammonium difficile qui devient particulièrement toxique pour la faune (Ryding, 1993).

La réduction des impacts de l'eutrophisation sur l'environnement passe par des réglementations environnementales en la matière. Dans les pays du Nord elles sont effectives et militent en faveur d'une réduction des effets des effluents pour la préservation des écosystèmes aquatiques et terrestres.

2.2.3.3 Les impacts locaux

Les impacts locaux englobent la toxicité humaine, l'écotoxicité et les nuisances.

a) La toxicité humaine

La toxicité humaine est liée à l'action que pourrait avoir les polluants générés par les activités anthropiques sur la santé humaine. La toxicité est par définition la capacité inhérente à une substance de produire des effets délétères sur l'organisme (Lauwerys et *al.*, 2007). L'intensité de cette action dépend de la dose administrée. Comme polluants on peut par exemple citer (Belhani, 2008) :

- Les métaux lourds tels que le mercure, le plomb, le cadmium, le chrome, le zinc, le cuivre, le nickel ;
- Les composés gazeux dont l'ammoniac, l'hydroxyde de soufre, les oxydes de soufre et d'azote, les acides chlorhydriques et sulfuriques, les composés organiques volatils, les poussières ;
- Les composés traces organiques : dioxines (PCDD) et furanes (PCDF), pesticides, PCB, perturbateurs endocriniens etc...

Il est admis que toute substance peut être toxique pour l'organisme et seule la dose admise au sein de l'organisme peut être un poison. La toxicité humaine d'une substance dépend de ses paramètres toxicologiques et de son effet. L'exposition par contre, caractérise la possibilité qu'un flux environnemental atteigne une cible (Belhani, 2008).

b) L'écotoxicité

Elle renvoie à l'effet que pourraient avoir les polluants issus des activités anthropiques sur les écosystèmes (la faune et la flore). Certains composés ont la capacité d'avoir un effet perturbateur dans le fonctionnement de l'écosystème dans lequel ils sont rejetés. C'est le cas par exemple des rejets dans les cours d'eau, qui entraînent souvent la modification de l'équilibre ionique avec pour conséquences des perturbations de la régulation osmotique pour les poissons (Renou, 2006). L'écotoxicité affecte les milieux aquatiques, les milieux terrestres et les sédiments.

c) Les nuisances

Elles peuvent être sonores, olfactives ou visuelles et constituer des préoccupations majeures pour les populations environnantes.

Les nuisances sonores se traduisent par une altération de l'ambiance sonore liée aux activités humaines. Sa perception dépend de l'individu considéré ainsi que de sa situation. Les effets peuvent aller du simple désagrément à la surdité. Les nuisances olfactives concernent surtout les odeurs nauséabondes qui altèrent la qualité de l'air ambiant, suite aux rejets dans l'air des substances chimiques nauséabondes telles que l'ammoniac, l'hydrogène sulfuré, les oxydes d'azote, les oxydes de soufre, les COV, etc...

Les nuisances visuelles quant à elles concernent l'aspect esthétique de l'environnement dans lequel se déroulent des activités humaines. Les activités minières participent profondément à la modification du paysage altérant parfois son aspect esthétique. Toutefois la notion d'esthétique dépend également du milieu dans lequel on se situe ainsi que des personnes ou individus qui l'apprécient.

2.3 Quelques outils de mise en œuvre du développement durable en entreprise

La mise en œuvre du développement durable se traduit soit par le changement radical du mode de développement actuel, soit par l'amélioration de l'efficacité du développement actuel (Belhani, 2008). Le changement radical du mode de développement actuel passe par le remplacement des valeurs admises par la société d'aujourd'hui par des valeurs nouvelles. En d'autres termes cette approche promeut l'abandon de la technologie et la simplicité volontaire (Belem et al. 2005). Les tenants de l'amélioration de l'efficacité du développement actuel considèrent que les difficultés rencontrées dans le mode de développement actuel sont attribuables à l'inefficacité des modes de production. En outre, ils proposent comme solution la dématérialisation qui, à long terme permettrait de réduire les consommations de ressources naturelles et d'énergie par unité de fonction ou de service. Mais l'option que retiennent les industriels aujourd'hui, est celle de concilier la recherche de la valeur ajoutée à la pression sociale en intégrant désormais dans la prise de décision les questions liées à l'environnement. Pour parvenir à cette fin, plusieurs outils de management environnemental en entreprise ont été développés parmi lesquels l'Analyse de Cycle Vie (ACV).

2.3.1 L'analyse de cycle de vie et ses approches

2.3.1.1 Généralités sur le concept cycle de vie

Bien avant l'avènement de la notion de développement durable, les pollutions industrielles étaient gérées dans l'approche "end of pipe", c'est – à – dire par un abattement des pollutions à leur sortie de l'entreprise avant d'être rejetés dans l'environnement. Cette façon de traiter les pollutions ne prend guère en considération les déchets et les pollutions engendrées par toutes les étapes de l'activité et se limite au traitement d'un seul type de pollution. Ainsi la vision de la protection de l'environnement dans cette approche s'avère biaisée d'autant plus que les impacts engendrés par le produit tout le long de son cycle de vie ne sont pas considérés. L'analyse de cycle de vie constitue l'un des outils qui permet de régler ce problème en prenant en compte les impacts environnementaux et sociaux engendrés par un procédé, un produit ou un service. Par définition l'analyse de cycle de vie (ACV) est un outil utilisé pour évaluer les effets associés à un produit, à un procédé ou à une activité (Brodhag et al., 2004). Pour la société de toxicologie et de chimie environnementale (SETAC), l'ACV est un processus objectif qui permet d'évaluer l'impact environnemental potentiel d'un produit, d'un service ou d'un procédé, par une identification et une quantification des flux de matières et d'énergie, des flux de déchets et de matières premières utilisées tout le long de son cycle de vie.

2.3.1.2 Historique de l'analyse de cycle de vie

La pratique de l'ACV remonte aux années 60, notamment dans l'analyse de l'utilisation des matières premières et des énergies primaires dans le système de production des emballages (Basset-Mens, 2005). L'apparition des pollutions chroniques locales, accidentelles et globales ainsi que l'épuisement des ressources naturelles relevé dans les années 70 par le rapport du Massachusetts Institute of Technology (MIT) sur les limites des ressources et le développement, ont également contribué au développement de l'ACV (Rousseaux, TI G5500). Avec la recrudescence des pollutions engendrées par les produits, la notion de cycle de vie se positionne progressivement pour mieux cerner leurs impacts environnementaux. C'est ce qui explique le fait que l'outil ACV soit devenu incontournable dans l'évaluation environnementale des produits. Le développement des ACV est assuré par l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), la Société de Toxicologie et de Chimie Environnementale (SETAC) et le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE).

2.3.1.3 L'analyse de cycle de vie et le développement durable

On a longtemps pensé que seules les solutions technologiques allaient permettre une réduction efficace et efficiente des impacts sur l'environnement des activités humaines. Celles-ci se sont développées tout en oubliant le fait qu'on ne saurait résoudre tous les problèmes environnementaux en même temps à travers la technologie. La mise au point de l'outil ACV vient ainsi combler ce manquement et s'ajouter à la technologie comme un outil permettant de prioriser les actions à engager ainsi que les mesures à prendre pour satisfaire à la logique du développement durable qui tient compte des contraintes économiques, des contraintes sociales et de l'efficacité environnementale. Pour Jolliet (2005) l'ACV est un outil incontournable dans la question du développement durable puisqu'elle prend en compte toutes les étapes du cycle de vie d'un produit et limite les déplacements de pollution d'un milieu à un autre d'une part ou d'une échelle à une autre d'autre part.

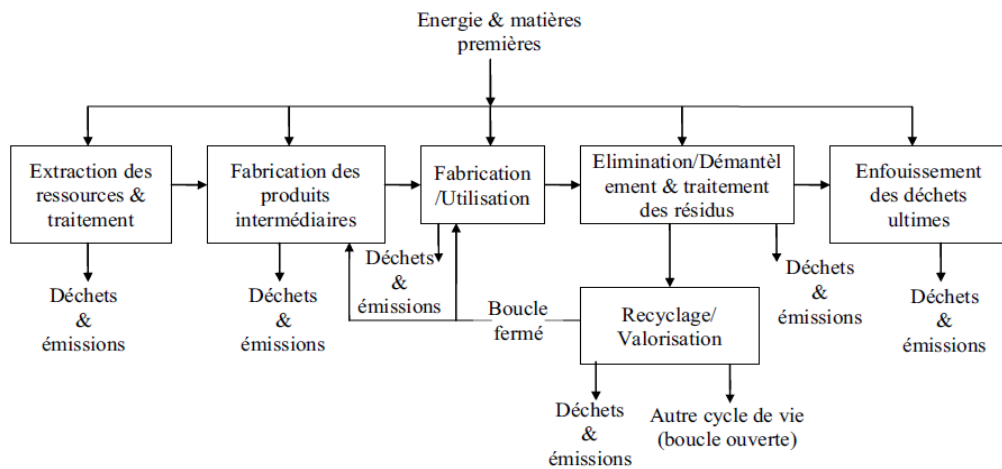
2.3.1.4 Principes de l'ACV

L'analyse de cycle de vie est fondée sur :

- la connaissance des flux entrants et sortants de matières et d'énergie associée à chaque étape du cycle de vie d'un produit, d'un service ou d'un procédé ;
- la connaissance des interactions qui existent entre ces différentes étapes avec la possibilité de créer des boucles de réutilisation des matières ;
- l'identification des impacts engendrés par le système étudié à chacune de ses étapes d'une part et dans sa globalité d'autre part.

L'analyse de cycle de vie peut se faire selon plusieurs approches. L'une dite << cradle to gate >> qui signifie du berceau à la porte et l'autre appelée approche << cradle to grave >> qui signifie du berceau à la tombe (Figure 2).

Figure 2 Cycle de vie d'un système selon l'approche <<du berceau à la tombe>>



Source : Belhani, 2008

La première approche renvoie à un inventaire des émissions et extractions des matières dans un système dont les frontières sont limitées en amont par l'extraction des matières premières et des ressources naturelles, puis en aval par le produit qui sort du système en question. La seconde quant à elle prend en compte toutes les activités consécutives directement ou indirectement associées à la production d'un produit, avec en amont l'extraction des ressources naturelles et en aval par la disparition ou la fin de vie du produit. On peut également envisager des approches "gate to gate" (de la porte à la porte) et "gate to grave" (de la porte à la tombe).

Les points forts de l'ACV résident dans le fait qu'il permet une évaluation quantitative des impacts environnementaux potentiels en intégrant le concept de cycle de vie (Rousseaux, TI-G5500). Ceci implique une prise en compte des transferts de pollution contrairement aux autres outils d'évaluation environnementale (Etude d'Impact Environnemental "EIE" et Système de Management Environnemental "SME"), ainsi qu'une détermination chiffrée des impacts à partir des indicateurs d'impacts. En revanche, l'ACV présente des lacunes en ce qui concerne la disponibilité et la qualité des données (données non mesurées par les exploitants, confidentialité, les incertitudes non établies, forte agrégation rendant l'utilisation difficile, données très peu uniformes) ainsi que la méthodologie qui ne permet pas toujours d'intégrer facilement les paramètres spatio-temporels pour une meilleure prise de décision.

2.3.2 Quelques usages de l'ACV

L'ACV a été utilisée au départ pour répondre aux problèmes de labellisation des produits simples tels les emballages ou les peintures, afin de favoriser les produits qui, à valeur marchande et qualité égales ont le moins d'impacts sur l'environnement (Rousseaux, TI D5500). Elle a par la suite trouvé son application dans une multitude de domaines. L'ACV est un outil utilisable dans les secteurs aussi bien

privés que publics. Dans le secteur privé et surtout au niveau des entreprises, l'utilisation de cet outil répond à des préoccupations d'ordre stratégiques alors que dans le secteur public il peut permettre d'améliorer la réglementation en matière d'environnement (Grisel & Osset, 2008).

2.3.2.1 L'ACV et l'exploitation minière

a) L'ACV et les performances environnementales des mines : Cas des mines de charbon

En ce qui concerne l'évaluation des performances environnementales de la production du charbon dans les mines Sud-Africaines au moyen de l'ACV, Mangena et ses collaborateurs (2006) mettent l'accent sur la nature de l'exploitation (mines à ciel ouvert et mines souterraines) et le niveau de traitement du charbon qui lui, dépend du type d'acheteur (local ou étranger). L'objectif visé dans cette étude est l'analyse des performances environnementales de la production de charbon afin de voir dans quelle mesure concilier celles-ci aux performances économiques. Les auteurs distinguent ici quatre options à savoir : mines à ciel ouvert et production de charbon de meilleure qualité, mine à ciel ouvert et production de charbon de qualité moyenne, mine souterraine et production de charbon de meilleure qualité, mine souterraine et production de charbon de qualité moyenne. L'unité fonctionnelle qui représente une quantité à laquelle les émissions et extractions se rapportent, est la tonne de charbon. Le système par contre, inclut l'extraction des matières premières, l'enrichissement, le transport et la distribution. Les résultats de l'inventaire du cycle de vie sont classés dans des catégories d'impacts qui sont pondérés de façon subjective tandis que la caractérisation des impacts permet de déterminer la contribution de chaque impact à une catégorie de dommages. La comparaison des performances environnementales des différentes options s'appuie sur les impacts enregistrés sur la ressource en eau, l'air, le sol et les ressources abiotiques. En dernier ressort, cette étude montre que la production du charbon quelle que soit la qualité, a un grand impact sur la ressource en eau, celui-ci n'étant pas lié à son utilisation mais plutôt à la toxicité qu'engendrent les rejets des sulfates. Ainsi selon les auteurs, le choix d'une option parmi les quatre étudiées va dépendre outre des performances environnementales enregistrées pour chaque cas, mais aussi de la géologie du site et du coût des opérations.

b) L'ACV et le management environnemental des entreprises minières

Afin de promouvoir un meilleur management environnemental des entreprises minières, Durucan et ses collaborateurs (2006) préconisent un outil appelé "LYCIMIN" qui s'inspire de l'ACV. Ceci permet de représenter clairement les activités qui se déroulent à l'échelle d'une exploitation minière à ciel ouvert ou souterraine, selon la géométrie du gisement, la profondeur et la technologie utilisée. Le but de cet outil est de déterminer selon les cas, les performances environnementales de l'exploitation minière en s'appuyant sur son étude détaillée. Cet outil constitue un modèle qui englobe l'étape de production du minerai brut, l'étape d'enrichissement, le traitement et l'élimination des déchets, la réhabilitation du site et son insertion dans le paysage, suivant une approche <<cradle to gate>>. L'avantage de ce modèle est qu'il est directement utilisable sur n'importe quel site et permet de mieux gérer la question des

coproduits et des allocations. Aussi il permet une allocation réaliste des émissions et extractions aux catégories d'impacts données. Ce modèle s'inspire d'une base de données flexible permettant une mise à jour des processus unitaires sans perturber sa structure afin d'envisager le type de management adapté à une situation donnée.

c) L'ACV et la gestion des résidus miniers

La gestion des résidus miniers et l'après mine constituent l'une des épine dorsales de la gestion de l'environnement à l'échelle d'une exploitation minière. Au regard des travaux de Reid et ses collaborateurs (2009) sur les mines souterraines de cuivre et zinc du Québec, force est de constater la grande corrélation qui existe entre l'exploitation minière et la production d'importantes quantités de résidus et déchets. Ceci engendre non seulement des impacts environnementaux importants sur le milieu, mais aussi de fortes modifications du paysage qui engendrent également des impacts sur l'utilisation des terres. A l'aide de l'outil ACV, deux options de gestion des résidus et déchets sont envisagés (stockage des résidus dans des espaces prévus à cet effet et l'utilisation des résidus pour le remblayage) tandis que trois scénarii de fermeture de la mine sont définis (la submersion des résidus, la désulfuration partielle avec un recouvrement par une couche de matériau désulfuré et la couverture par des sols naturels). A partir des combinaisons d'options et de scénarii précédents, les points critiques du point de vue environnemental sont détectés en vue des comparaisons pour un choix optimal. Il en résulte que l'option d'utilisation des résidus pour le remblayage enregistre le plus grand score d'impact, ce à cause d'énormes quantités de matières et d'énergie qu'il engendre. En revanche l'ampleur des impacts tels que l'acidification des eaux, la toxicité et l'occupation des sols dépend de la gestion de l'eau et des sols à l'échelle du site. La fermeture de la mine par couverture par le sol naturel constitue une solution difficile car nécessite d'importants travaux. Enfin l'option de stockage des résidus associée à la fermeture de la mine par submersion engendre le moins de dommages sur l'environnement et nécessite peu d'efforts.

2.3.3 L'ACV et quelques outils de management environnemental

2.3.3.1 Le Système de Management Environnemental et l'Analyse de Cycle de Vie

Le management environnemental est une << nouvelle dimension du management des organisations qui confère à l'entreprise un rôle de gestion et de protection de son environnement physique >> (CENECO, 1995). Il est également considéré comme l'<<ensemble des activités coordonnées permettant d'orienter et de contrôler un organisme en matière d'environnement>> (Brodhag et al, 2004). La mise en œuvre du management environnemental en entreprise se traduit par la définition au sein de celle-ci, d'un système de management environnemental. Comme l'ACV (qui s'appuie sur la série des normes Iso 14040 à 14043), le système de management environnemental s'appuie sur des normes ISO 14001 à 14004. Les résultats d'une analyse de cycle de vie permettent de contribuer à la gestion des impacts dans le cadre d'un système de management environnemental (SME). Le SME étant <<une composante

du système de management d'un organisme utilisé pour développer et mettre en œuvre sa politique environnementale et gérer les aspects environnementaux>> (Pinet, 2009). Le SME débouche sur les performances environnementales qui traduisent les résultats mesurables de l'engagement pris par l'organisme en ce qui concerne ses aspects environnementaux (Pinet, 2009). L'ACV et le SME sont toutes des démarches volontaires permettant à une organisation ou une entreprise de mieux maîtriser les impacts de leurs activités sur l'environnement. La différence entre l'ACV et le SME est que l'ACV est appliqué à un système (produit, procédé ou service) par la gestion de son cycle de vie alors que le SME est appliqué à l'organisation ou à l'entreprise au niveau de la maîtrise des processus (Legal, TI A 4 130). L'impact du cycle de vie d'un système tel que évalué au moyen de l'ACV n'a ni frontière géographique, ni frontière temporelle contrairement au SME qui est appliqué dans un endroit précis et à un moment donné. En plus l'ACV s'inscrit dans une approche globale contrairement au SME qui s'inscrit dans une approche locale. Les résultats d'une ACV peuvent permettre d'améliorer les performances environnementales à l'échelle d'une entreprise ou encore se conformer aux exigences réglementaires.

2.3.3.2 L'Analyse Multicritère et l'Analyse de Cycle de Vie

L'AMC est un outil d'aide à la décision qui permet d'évaluer le problème qui se pose en établissant des ordres de préférences au regard des options et critères en présence. Le tableau 3 permet d'avoir une ébauche d'analyse comparative entre l'AMC et l'ACV. Il faut noter que des combinaisons d'outils pour évaluer les performances environnementales à l'échelle d'une entreprise ont déjà été faites. On peut par exemple citer Herman et al (2006) qui combinent l'ACV, l'AMC et certains indicateurs pour évaluer les performances environnementales d'une entreprise, ainsi que Benoît et Rousseaux (2003) qui ont mené une étude sur la possibilité de combiner des outils pour apprécier les résultats d'une ACV.

Dans une combinaison ACV-AMC pour l'évaluation des performances environnementales d'une entreprise, l'objectif est d'additionner et pondérer les résultats de l'ACV, au moyen des options et critères définis de façon subjective par l'AMC, afin d'obtenir un score global d'impact (Herman et al., 2006). Dans cette étude l'AMC et notamment la méthode AHP, est utilisée pour déterminer les priorités en matière d'amélioration des performances environnementales à l'échelle de l'entreprise minière à partir d'une agrégation des résultats obtenus grâce à l'ACV.

Tableau 3 Comparaisons entre l'ACV et L'AMC

	Analyse de cycle de vie (ACV)	Analyse multicritère (AMC)
Application	Evaluation des impacts environnementaux d'un produit, d'un service, d'un procédé le long de son cycle de vie	Evaluation de toutes les conséquences environnementales d'une alternative
Procédure	Définition du champ d'étude, inventaire des émissions et extractions, évaluation des impacts et analyse	Prise de décision au moyen des critères identifiés, attribution de poids aux critères et obtention d'un score global, puis analyse des résultats
Résultats attendus	Des scores d'impacts pour chaque catégorie d'impact, des scores de dommages pour chaque catégorie de dommage, des scores d'impacts et de dommages agrégés	Score global à partir de l'agrégation des poids des différents critères
Avantages	Règle le problème de transfert de pollution, obtention des résultats élargis au cycle de vie d'un produit, objectivité	Possibilité d'attribuer des poids aux critères, l'obtention d'un score global d'impact
Inconvénients	Nécessite assez de temps, de données, difficultés d'interprétation des résultats	Subjectif, ne prend en considération qu'une partie du cycle de vie d'un produit, d'un procédé

Source : Herman et al., 2006 ; modifié

La méthode AHP (Analytic Hierarchy Process) (Saaty, 1995 ; Macoun et al., 2000), permet la décomposition d'un problème complexe en niveaux hiérarchiques, afin d'effectuer des combinaisons binaires, déterminer les priorités, synthétiser les priorités puis établir la cohérence des jugements. C'est une méthode assez utilisée en raison des éléments suivants :

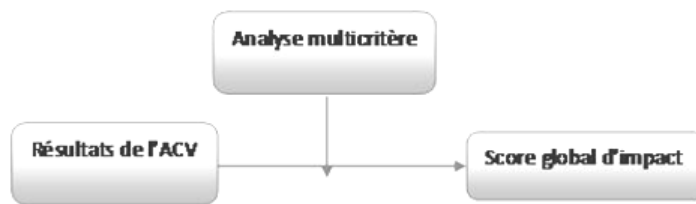
- les unités de mesures sont quantitatives ou qualitatives, les valeurs sont absolues ou relatives ;
- les éléments du système sont triés et organisé suivant les niveaux jugés similaires ;
- la détermination des priorités se fait sur la base d'un jugement logique et consistant ;
- les éléments d'un système sont interdépendants et pas forcément linéaires.

En définitive, dans l'industrie minière, l'utilisation de l'ACV qui remonte aux années 1990, avait pour objectif la réalisation des inventaires de cycle de vie des procédés de production des métaux afin de sélectionner les produits de consommation et leur conception. Aujourd'hui plusieurs études ont été faites dans l'exploitation minière au moyen de l'ACV en mettant beaucoup plus l'accent sur les processus d'enrichissement et de raffinage des minerais. Cependant, peu d'études en rapport avec l'extraction des minerais ont été faites (Durucan et al. 2006), occultant ainsi la prise en compte dans l'exploitation minière des impacts et des déchets engendrés par cette étape. Par ailleurs, en combinant l'ACV à d'autres outils tels l'AMC, dans les entreprises minières, l'on pourrait arriver à une évaluation plus objective des performances environnementales et une prise de décision beaucoup plus éclairée en faveur de son amélioration.

3 Cadre méthodologique

La méthodologie utilisée dans cette étude, s’inspire des travaux antérieurs relatifs à la combinaison d’outils pour une meilleure gestion et protection efficace de l’environnement d’une part. D’autre part nous nous appuyons sur les travaux réalisés durant le stage de mise en situation professionnelle effectué à l’Institut Jean Lamour de l’école des mines de Nancy, dont les éléments du rapport sont présentés en annexe (Annexe 9.4). Nous nous limiterons dans cette étude à la combinaison de deux outils à savoir : l’ACV et l’AMC. La méthodologie de l’ACV s’appuiera sur les directives de la série des normes ISO 14040, ISO14041, ISO14042, ISO 14043 ainsi que des prescriptions de la SETAC. L’AMC va se baser sur l’Analyse Hiérarchique des Processus (AHP). L’étude est faite selon le cadre défini dans la figure 3.

Figure 3 Cadre méthodologique global de l’étude

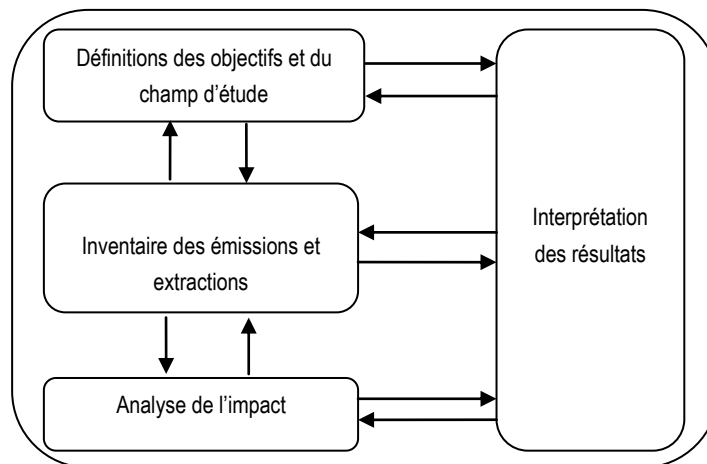


Source : Auteur

3.1 L’analyse de cycle de vie

Elle se déroule en 4 étapes selon la démarche présentée à la figure 4.

Figure 4 Cadre méthodologique d’une analyse de cycle de vie



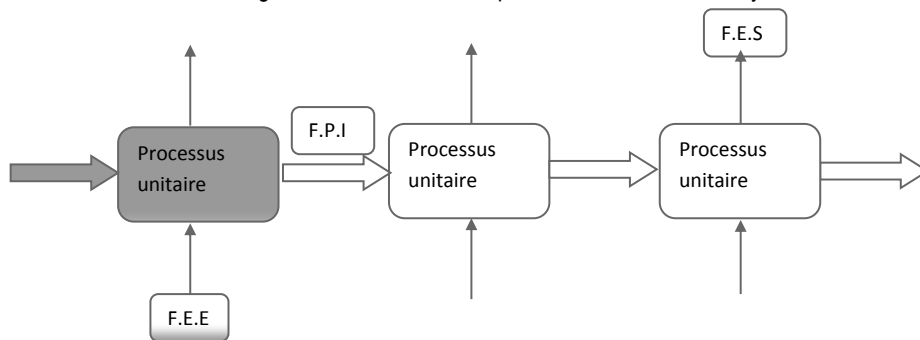
Source : ISO 14040, 1997

3.1.1 La définition des objectifs et du système

Cette rubrique de l'ACV permet de faire une description minutieuse de l'étude et de ressortir le champ de l'étude en adéquation avec les objectifs du système. La détermination du champ de l'étude telle que définie par la norme ISO 14040 (1997) implique principalement la définition des éléments suivants: la fonction du système, l'unité fonctionnelle, les frontières du système ainsi que les limites de l'étude (Jolliet et al, 2005).

La définition de la fonction est primordiale pour la détermination de l'unité fonctionnelle et des limites du système, ce d'autant plus qu'un système peut engendrer outre le produit principal, un ou plusieurs produits secondaires (Jolliet et al., 2005). L'unité fonctionnelle (UF) renvoie à la quantification de la fonction étudiée et est exprimée sous forme d'unité de grandeur mesurable, additive et entière². Les limites du système doivent être clairement définies pour éviter des efforts supplémentaires sur des études de certains processus unitaires alors qu'il n'en faut pas. Par exemple dans le cas de l'exploitation minière il serait assez pénible d'élargir le système étudié aux processus qui entrent dans la fabrication des excavateurs³.

Figure 5 Ensemble des processus unitaires d'un système



FEE= Flux Élémentaires Entrants, FES= Flux Élémentaires Sortants, FPI= Flux de produits Intermédiaires

Source : Auteur, adapté d'après ISO 14041b, 1999

Le système est défini à partir des relations qui existent entre les différentes composantes appelées processus unitaires et tient également compte de la fonction étudiée. Elle débouche sur la construction d'un arbre à processus (Jolliet, 2005). Les processus unitaires sont liés les uns aux autres par des flux dits de produits intermédiaires (figure 5). Les flux élémentaires qui entrent dans le système constituent les intrants (ressources naturelles, énergie) et ceux qui en sortent sont appelés extrants (produit, émissions dans le milieu naturel, nuisances). Mais sur le plan pratique, il est impossible d'introduire dans le système tous les processus unitaires du fait du manque de données et du problème d'allocations des émissions et extractions.

² L'impact de deux unités fonctionnelles est égal au double de celui d'une unité fonctionnelle (Jolliet et al., 2005)

³ Un excavateur est un engin à chenilles servant à creuser.

3.1.2 Inventaire des émissions et extractions

Cette étape de l'ACV permet de présenter les flux entrants et sortants du système (Enrico, TI G5510). L'inventaire dans cette étude se focalise uniquement sur les extrants du système. Les données utilisées sont celles de la base des données du logiciel Gabi 4. Une évaluation de la qualité des données est également faite à partir de ce logiciel. On obtient ainsi le bilan qui permet de déterminer les données quantifiées de trois groupes d'émissions à savoir: les émissions dans l'eau, les émissions dans l'air et les émissions dans les sols industriels.

3.1.3 L'analyse de l'impact

Selon Jolliet et ses collaborateurs (2005), l'analyse de l'impact comporte trois étapes : la classification, la caractérisation intermédiaire, la caractérisation des dommages. Ces trois étapes peuvent être suivies par la normalisation. Mais, la caractérisation des dommages n'entre pas dans notre champ d'étude.

3.1.3.1 La classification

Elle consiste à définir la série de catégories d'impacts intermédiaires retenus pour l'étude et de classer les émissions et extractions associés aux différentes catégories d'impacts.

3.1.3.2 La caractérisation intermédiaire

Cette phase permet de trouver le score de caractérisation intermédiaire pour chaque catégorie d'impacts selon la formule : $SI_i = \sum F_{Isi} \times M_s$ avec :

- F_{Isi} le facteur de caractérisation intermédiaire qui traduit la contribution de la substance S à la catégorie d'impacts i.
- M_s la masse de la substance S émise ou extraite
- SI_i le score de caractérisation intermédiaire pour la catégorie d'impact i

3.1.3.4 La normalisation

La normalisation permet de déterminer l'importance relative de la contribution de chaque catégorie d'impact intermédiaire à l'impact environnemental global du système étudié. Des facteurs de normalisation sont définis pour chaque catégorie d'impact. Les facteurs de normalisation des impacts utilisés dans cette étude et pour chaque catégorie intermédiaire sont des facteurs de normalisation pris à l'échelle globale pour l'année 1995, ceci à cause de l'absence d'un facteur de normalisation spécifique au Cameroun. La valeur normalisée du score d'une catégorie d'impact est donnée par la formule suivante : SI_i/N_i , avec SI_i le score intermédiaire pour la catégorie d'impact i et N_i , le facteur de normalisation.

S'il est vrai que la connaissance de la contribution de chaque catégorie d'impact à l'impact environnemental global du système est nécessaire, nous ne devons pas oublier le fait que l'entreprise devra déterminer les émissions sur lesquelles elle devra envisager des actions afin d'améliorer ses performances du point de vue environnemental. Ceci suscite également de délimiter les perspectives dans lesquelles les émissions doivent être réduites c'est-à-dire voir si l'action s'inscrit dans la réponse aux exigences locales, globales ou régionales. D'où le recours à une autre technique d'analyse appelée Analyse Multicritère.

3.2 L'analyse des impacts au moyen de l'analyse multicritère

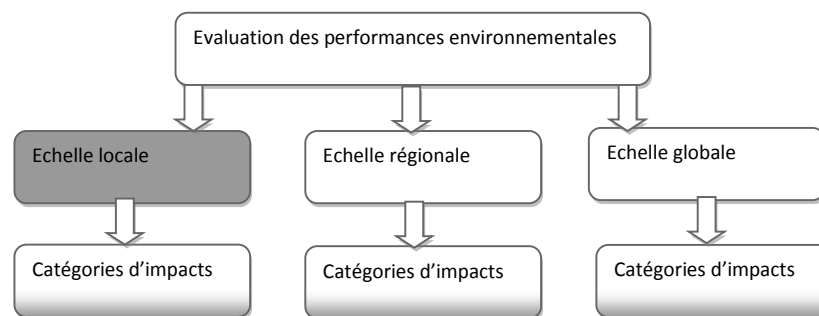
La méthode d'AMC utilisée dans cette étude est fondée sur la démarche AHP à travers les étapes suivantes:

- la détermination des critères et des options ;
- l'évaluation comparée des critères et options choisis ;
- la détermination des priorités ;
- la synthèse des priorités ;
- le choix et interprétations et ;
- la détermination de la cohérence des résultats.

3.2.1 La détermination des critères et des options

Il est question dans cette étape de décomposer le problème d'évaluation des performances environnementales de l'entreprise minière en une structure hiérarchique en s'appuyant sur les éléments tirés de l'ACV. Ainsi, les critères définis portent sur les échelles spatiales dans lesquelles on se situe à savoir l'échelle locale, l'échelle régionale et l'échelle globale. Les options considérées ici sont les catégories d'impacts intermédiaires lorsqu'on se trouve dans chaque échelle spatiale (Figure 6).

Figure 6 Hiérarchisation du problème



Source : Auteur

3.2.2 L'évaluation comparée des critères et options choisis

Cette évaluation repose sur une question répétitive du genre : " quelle est l'importance de telle catégorie d'impact par rapport à telle autre catégorie d'impact". Ce questionnement s'effectue à toutes les échelles et pour toutes les catégories d'impacts prises paires par paires. Les réponses à la question précédente sont codées à l'aide des chiffres d'importance variable (Tableau 4).

Tableau 4 Codification des réponses à la question "quelle catégorie est importante que l'autre ?"

Echelle numérique	Echelle verbale
1	Importance égale des deux catégories
3	Une catégorie d'impact est un peu plus importante que l'autre
5	Une catégorie d'impact est plus importante que l'autre
7	Une catégorie d'impact est beaucoup plus importante que l'autre
9	Une catégorie d'impact est absolument plus importante que l'autre
2,4,6,8	Valeurs intermédiaires entre deux catégories pour nuancer les réponses

Source : Saaty, 1984

La mise en œuvre de l'évaluation comparative des catégories d'impacts fait appel à des combinaisons binaires au moyen des matrices carrées (KxK) à toutes les échelles d'appréciation, avec K, le nombre de catégories d'impacts pris en considération. Soient trois catégories d'impacts i,j,l, avec $i > j > l$. Soit a, la valeur numérique d'une cellule. Sachant que $a = a_{ij}$, avec $a_{ii} = 1$ et $a_{ji} = 1/a_{ij}$, et que i est légèrement plus important que j et plus important que l, on obtient la matrice suivante (Tableau 5) :

Tableau 5 . Exemple de matrice d'évaluation comparative

	i	J	l
i	1	3	5
J	1/3	1	3
l	1/5	1/3	1

Source : Auteur

3.2.3 La détermination des priorités

Les priorités sont déterminées à partir des matrices de chaque critère, grâce au calcul du poids de chaque catégorie d'impact selon la démarche suivante :

- calcul de la somme des valeurs (V) des cellules au niveau de chaque colonne de la matrice (S) ;
- calcul du rapport $\frac{V}{S}$ pour chaque cellule ;

- addition des valeurs V/S des cellules le long de chaque ligne pour obtenir une valeur $G = \sum \frac{V_i}{S}$;
- obtention du poids d'une catégorie d'impact P, avec $P = \frac{G}{N}$ où N est le nombre de catégories d'impacts.

3.2.4 La synthèse des priorités

Après l'obtention des poids de chaque catégorie d'impact, il est question de procéder au calcul d'un score global d'impact pour chaque critère retenu. Ce score global F s'obtient par la formule suivante qui combine les valeurs normalisées des catégories intermédiaires obtenues lors de l'ACV au poids de chaque catégorie d'impact obtenu par l'analyse multicritère : $F = \sum [S_{li} \times P/N_i]$ (Herman et al., 2007), avec S_{li} le score intermédiaire pour la catégorie d'impact i, N_i , le facteur de normalisation et P le poids de chaque catégorie d'impacts.

3.2.5 Vérification de la cohérence des jugements

Cette vérification permet d'établir l'efficacité des jugements effectués ainsi que la logique qui leur est associée. Elle est déterminée par la démarche suivante :

- Calcul d'une valeur λ_{max} à partir des données de la matrice et des poids des catégories d'impacts obtenus
- Calcul de l'indice de cohérence $IC = (\lambda_{max} - N)/(N - 1)$, avec N le nombre de catégories d'impacts comparés.
- Calcul du ratio de cohérence $RC = IC/IA$, avec IA les indices aléatoires définis de façon empirique pour chaque nombre d'éléments à comparer par Saaty (Tableau 6). Si $RC < 10\%$ les résultats obtenus sont dits "cohérents". Si $RC > 10\%$, le jugement qu'on a effectué va nécessiter des révisions (Saaty, 1984).

Tableau 6 Indices aléatoires

Nombre d'éléments à comparer	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
IA	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51

Source : Saaty, 1995

3.2.6 Analyse et interprétation des résultats

L'analyse des résultats obtenus va permettre de déterminer les priorités sur lesquelles l'entreprise minière devra agir pour améliorer ses performances environnementales. Cette analyse va déboucher

sur la proposition d'un cadre logique permettant d'assurer un suivi efficace des points critiques relevés dans l'analyse de cas étudié.

En somme, notre méthodologie s'est profondément appuyée sur les acquis de la démarche utilisée lors du stage de mise en situation professionnelle. Ce dernier a porté sur l'inventaire du cycle de vie de la filière fonte intégrée et classique, de l'entreprise Saint-Gobain de Nancy en France (Annexe 9.3). Cet inventaire a également fait l'objet d'une implémentation sous le logiciel d'ACV Gabi 4. La mise en œuvre de cette méthodologie permettra dans le chapitre suivant, d'obtenir les performances environnementales du cas étudié, d'élaborer le processus de prise de décision et d'envisager des recommandations à l'endroit des différents acteurs du secteur minier camerounais.

4 APPLICATION A L'EXPLOITATION D'UNE MINE DE FER ET PERSPECTIVES POUR L'EXPLOITATION MINIERE AU CAMEROUN

Les résultats présentés et analysés dans ce chapitre permettent de préconiser des recommandations à l'endroit du gouvernement, des entreprises minières et des organisations de la société civile, en matière de protection de l'environnement en contexte minier au Cameroun. Le cas étudié qui est celui d'une mine de fer, présente non seulement l'applicabilité d'une combinaison d'outils pour une meilleure évaluation environnementale, mais permet aussi de dégager une démarche de prise de décision en vue de réduire les impacts environnementaux des industries minières. Les résultats des impacts potentiels pour chaque catégorie constituent des indicateurs de condition environnementale.

4.1 Analyse des performances environnementales d'une exploitation minière : cas d'une mine de fer

Pour l'analyse des performances environnementales de l'exploitation minière en question, il va falloir procéder successivement à son analyse de cycle de vie, puis à la prise de décision sur les points critiques du point de vue environnemental, ce au moyen de l'Analyse Hiérarchique des Processus (AHP).

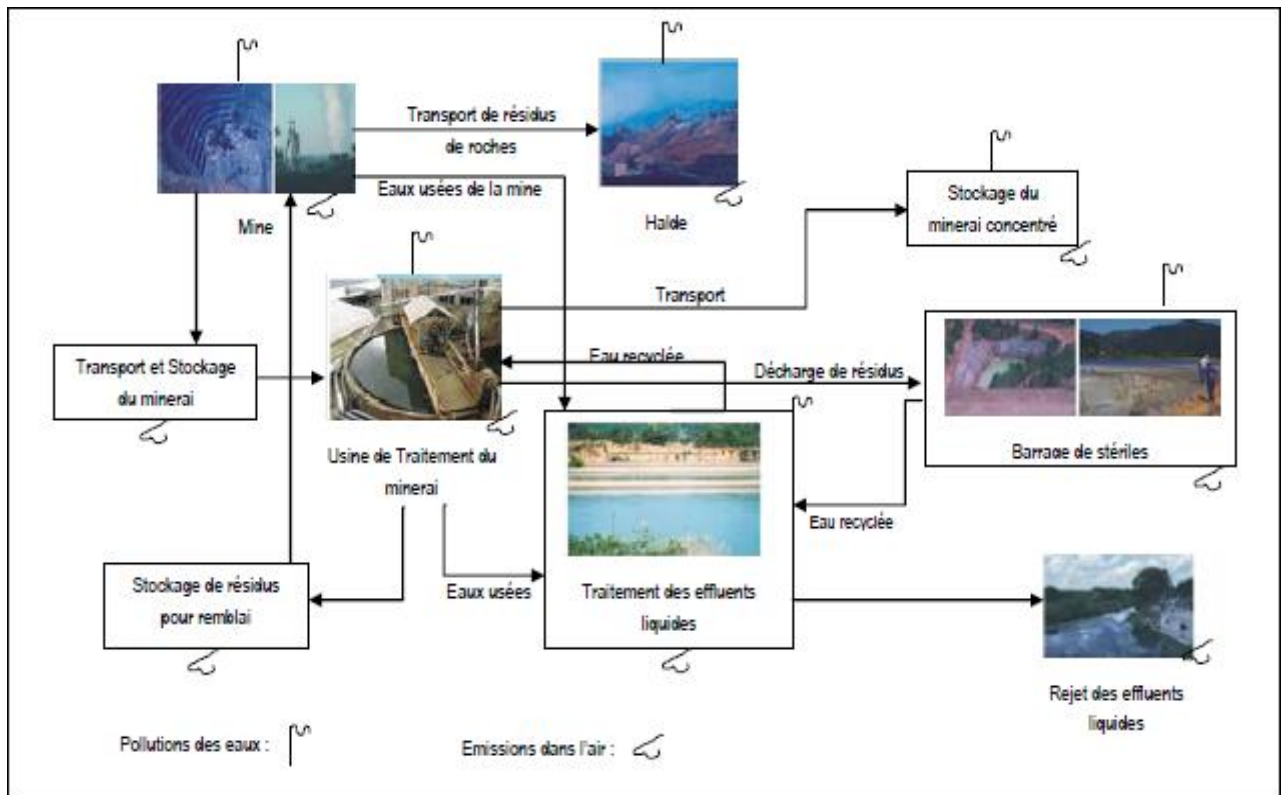
4.1.1 Analyse du cycle de vie d'une mine de fer

Elle se fait à partir du cadre méthodologique développé dans le chapitre précédent.

a) Définition des objectifs et du champ d'étude

Le système de production considéré dans cette étude (Figure 7) a pour fonction la production du minerai de fer brut. Ce système comporte la mine où se déroulent les activités d'extraction des roches. Les roches extraites sont stockées dans un entrepôt avant d'être acheminées vers l'usine de traitement qui permettra d'obtenir le minerai concentré, prêt à l'usage dans l'industrie métallurgique. L'extraction du minerai et son traitement à l'usine, engendrent d'importants résidus de roches stockées au niveau des haldes, puis des stériles rassemblés au niveau des barrages prévus à cet effet. En principe, selon la figure 7, les eaux usées issues de la mine, de l'usine de traitement du minerai et du barrage des stériles, doivent être traitées au niveau de la station de traitement. Ce, afin d'obtenir des effluents liquides moins nocifs pour l'environnement et réutilisables au niveau de certaines entités du système. Il est également important de souligner qu'à tous les niveaux du système, des émissions dans l'air et dans l'eau sont susceptibles de survenir. Par ailleurs, les transports entre les différentes entités du système ne doivent pas être négligés. L'objectif de l'étude dans ce cas, est de ressortir les points environnementaux critiques et déterminer l'impact potentiel de la production du minerai de fer brut.

Figure 7 Système de production d'une mine adapté à la production du minerai de fer



Source : Durucan et al, 2006, modifié

L'unité fonctionnelle à laquelle les émissions et extractions sont rapportées est le kilo de minerai de fer brut. Le système de production du kilo de minerai de fer considéré dans cette étude comporte les entités désignées dans l'arbre à processus de la figure précédente.

b) Inventaire des émissions

Les émissions prises en considération dans cette étude sont limitées à celles couramment utilisées pour caractériser les catégories d'impacts choisies au préalable. Ainsi on va distinguer les émissions dans l'eau (Tableau 7), les émissions dans les sols industriels (Tableau 8) et les émissions dans l'air (Tableau 9), rapportées au kilogramme de minerai de fer produit. En théorie, ces émissions prennent en compte toutes les entités du système précédent, partant de l'extraction au niveau de la mine à l'obtention du minerai concentré. Les calculs préalables à l'obtention de ces données ont été effectués à l'aide du logiciel d'analyse de cycle de vie Gabi4. Le bilan obtenu dans chaque cas, prend en compte tous les flux de matière et d'énergie considérés comme faisant partie du système. Les quantités de substances émises dans l'eau, l'air et les sols industriels sont exprimées en kilogramme par kilogramme de minerai brut produit (kg/kg). Elles sont déterminées à partir des données de la littérature sur le sujet,

comme précisé dans la base de données du logiciel Gabi4. Il est important de rappeler que ces données⁴ sont spécifiques à la production du minerai de fer dans les mines africaines, comme le précise également, la base de données de Gabi4.

Tableau 7 Emissions dans l'eau

Emissions dans l'eau	Masse (Kg)
Biological oxygen demand (BOD)	1,18717E-08
Chemical oxygen demand (COD)	3,43568E-07
Nitrogenous Matter (Kjeldahl, as N)	1,20677E-09
Arsenic (+V)	1,71764E-10
Cadmium (+II)	1,2017E-09
Nickel (+II)	2,93498E-08
Ammonia (NH ₄ ⁺ , NH ₃ , as N)	2,06186E-07
Nitrate	3,1634E-07
Phosphates (as P)	1,84096E-10
Phosphorus	3,56667E-07
Nitrite	2,01012E-06
Trichloromethane (chloroform)	6,05727E-14
Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH, unspec.)	3,11201E-09
Particles to fresh water	3,25842E-05
Dichloromethane (methylene chloride)	1,74E-10

Source : Base de données du logiciel Gabi4

Tableau 8 Emissions dans les sols industriels

Emissions dans les sols industriels	Masse (Kg)
Arsenic (+V)	1,00147E-11
Cadmium (+II)	4,531E-15
Chromium (unspecified)	1,25377E-10
Mercury (+II)	8,34592E-16
Nickel (+II)	3,45323E-14
Nitrogen	3,92429E-13
Phosphorus	1,25389E-09

Source : Base de données du logiciel Gabi4

Tableau 9 Emissions dans l'air (Source : base données du logiciel Gabi4)

Emissions dans l'air	Masse (Kg)
Antimony	1,25678E-09
Arsenic (+V)	2,02045E-09

⁴ Les substances émises sont rapportées au Kilogramme de fer brut produit par le système. Ces émissions sont celles couramment utilisées pour caractériser les différentes catégories d'impacts retenues pour cette étude.

Emissions dans l'air	Masse (Kg)
Cadmium (+II)	5,86227E-10
Mercury (+II)	8,16027E-11
Nickel (+II)	1,37775E-08
Ammonia	4,23261E-09
Carbon dioxide	0,023065
Carbon monoxide	0,000113502
Hydrogen chloride	7,51497E-07
Hydrogen fluoride	2,9649E-08
Hydrogen sulphide	3,70086E-08
Nitrogen oxides	0,000112859
Nitrous oxide (N2O)	2,08673E-06
Phosphorus	3,23715E-09
Sulphur oxides (as SO2)	3,43338E-05
Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH)	4,97729E-10
AOX (Adsorbable Organic Halogens)	1,22991E-19
Dioxins (unspec.)	3,0413E-16
Methane	0,000025776
Dust (PM10)	8,9261E-06
Acetic acide	1,48E-08
Halon (1301)	4,95E-10

Source : Base de données du logiciel Gabi 4

c) Analyse des impacts

La caractérisation des impacts environnementaux de la production d'un kilogramme de fer se limite au niveau intermédiaire et à la normalisation des impacts potentiels. Le choix des catégories d'impacts est fondé sur la nature des émissions engendrées par la production du kilo de fer brut. Les catégories d'impacts choisies pour relever les impacts engendrés par la production du kilogramme de fer sont les suivantes :

- le potentiel de réchauffement global sur 100 ans (Global warming potential "GWP") ;
- le potentiel d'acidification (Acidification potential "AP") ;
- le potentiel d'eutrophisation (Eutrophication potential "EP") ;
- le potentiel de toxicité humaine (Human toxicity potential "HTP") ;
- l'écotoxicité terrestre (Terrestrial ecotoxicity "Ter. Ec.");
- la formation photochimique de la couche d'ozone (Photochemical ozone formation "POF").

Les différentes émissions ainsi que leurs facteurs de caractérisation intermédiaire orientés problèmes sont consignés dans les tableaux 10, 11 et 12.

D'après le tableau 10, on note que, les émissions retenues ne contribuent pas du tout à l'acidification (AP). Leur contribution à la formation de l'ozone troposphérique est négligeable.

Tableau 10 Emissions dans l'eau et facteurs de caractérisation

Emissions dans l'eau	GWP	HTP	Ter. EC	P O F	A P	Eut
Biological oxygen demand (BOD)						
Chemical oxygen demand (COD)						0,022
Nitrogenous Matter (Kjeldahl, as N)						0,42
Arsenic (+V)		950	1E-17			
Cadmium (+II)		0,23				
Nickel (+II)		330	1E-18			
Ammonia (NH ₄ ⁺ , NH ₃ , as N)						0,35
Nitrate						0,1
Phosphates (as P)						1
Phosphorus						3,06
Nitrite						0,1
Trichloromethane (chloroform)	30	13	4E-05			
Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH, unspec.)		280000	0,0021			
Particles to fresh water		59	9E-07			
Dichloromethane (methylene chloride)	8,7	2	4E-06	0,068		

Source : CML (2004)

En ce qui concerne les émissions dans les sols industriels, on note une prépondérance des cations métalliques (Tableau 11). Dans l'ensemble, les émissions retenues ne contribuent pas au réchauffement climatique (GWP), ni à la toxicité humaine (HTP), ni à la formation de l'ozone troposphérique (POF) et ni à l'acidification (AP). Par contre leur contribution à l'eutrophisation est négligeable.

Tableau 11 Emissions dans les sols industriels et facteurs de caractérisation

Emission dans les sols industriels	GWP	HTP	Ter. EC	POF	A P	EP
Arsenic (+V)		1000	3300			
Cadmium (+II)		79	22			
Chromium (unspecified)		300	6300			
Mercury (+II)		1100	56000			
Nickel (+II)		200	240			
Nitrogen						0,42
Phosphorus						3,06

Source : CML (2004)

Les émissions dans l'air par contre, contribuent à toutes les catégories d'impacts, contrairement aux émissions précédentes (sols et eau) (Tableau 12).

Tableau 12 Emissions dans l'air et facteurs de caractérisation

Emissions dans l'air	GWP	HTP	Ter. EC	POF	A P	Eut
Antimony		6,7E+03	6,10E-01			
Arsenic (+V)		3,5E+05	1,6E+03			
Cadmium (+II)		1,5E+05	8,1E+01			
Mercury (+II)		6,0E+03	2,8E+04			
Nickel (+II)		3,50E+04	1,20E+02			
Ammonia		1,0E-01			1,6E+00	3,5E-01
Carbon dioxide	1,0E+00					
Carbon monoxide				2,7E-02		
Hydrogen chloride		5,0E-01				
Hydrogen fluoride		2,9E+03	2,9E-03			
Hydrogen sulphide		2,2E-01				
Nitrogen oxides		1,2E+00			5,0E-01	1,3E-01
Nitrous oxide (N2O)	3,0E+02					2,70E-01
Phosphorus						3,06E+00
Sulphur oxides (as SO2)		9,6E-02		4,80E-02	1,20E+01	
Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH)		5,7E+05	1,0E+00			
AOX (Adsorbable Organic Halogens)		1,0E+00				
Dioxins (unspec.)		1,9E+09	1,2E+04			
Methane	2,5E+01			6,0E-03		
Dust (PM10)		8,2E-01				
Acetic acide				6,41E-01		
Halon (1301)	7,1E+03	1,2E+01				

Source : CML (2004)

Le tableau 13 ci-dessous présente les valeurs des impacts potentiels obtenus après calcul du score d'impact potentiel pour chaque catégorie d'impact intermédiaire d'une part. D'autre part les scores d'impacts potentiels normalisés par catégorie d'impact y sont également consignés.

Tableau 13 Impacts potentiels (Pli), Facteurs de normalisation (Ni) et Impacts potentiels normalisés (Pli/Ni)

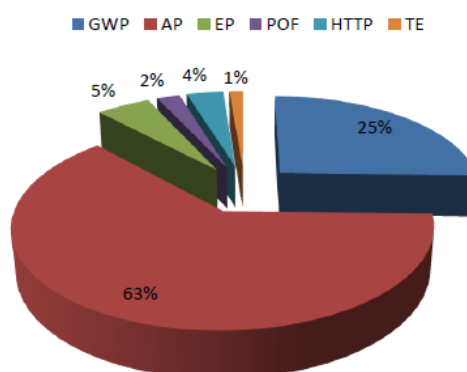
Catégorie d'impacts	Impact potentiel (Pli)	Facteur de Normalisation (Ni)	(Pli/Ni)
GWP (KgCO2eq.)	2,43E-02	4,10E+13	5,934E-16
HTP (Kg 1,4-dichlorobenzène eq.)	4,61E-03	5,70E+13	8,082E-17
Ter. EC (Kg 1,4-dichlorobenzène eq.)	8,04E-06	2,70E+11	2,979E-17
P. Ox (Kg éthylène eq.)	4,88E-06	9,60E+10	5,08E-17
A P (Kg SO2 eq.)	4,68E-04	3,20E+11	1,464E-15
Eut (Kg PO4---eq.)	1,67E-05	1,40E+11	1,19E-16

Source : CML, 2004 & Auteur

d) *Interprétations des résultats*

Les calculs de l'impact potentiel de la production d'un kilogramme de minerai de fer montrent que l'impact potentiel du changement climatique est le plus élevé de toutes les catégories d'impacts considérées, tandis que le potentiel de formation photochimique de l'ozone enregistre le plus faible impact potentiel sur l'environnement (Tableau 13). Si on se limite à ce niveau d'évaluation, l'entreprise sera beaucoup plus portée vers la limitation de ses émissions de gaz à effet de serre.

Figure 8 Impacts potentiels Normalisés de la production d'un kilogramme de minerais de fer



Source : Auteur

Par contre lorsqu'on normalise les résultats du tableau 13 précédent à partir des facteurs de normalisation, l'on se rend compte que le potentiel d'acidification constitue l'impact le plus important de toutes les catégories d'impacts alors que l'écotoxicité terrestre enregistre le plus faible score d'impact (Figure 8). Ceci permet d'avoir une idée sur l'impact potentiel de la production d'un kilogramme de fer à l'échelle d'une entreprise minière, sur l'environnement.

Cependant l'importance des impacts doit être définie afin de permettre à l'entreprise de prendre des décisions éclairées par rapport au type d'émissions ou à la catégorie d'impact sur laquelle il va falloir agir pour réduire l'impact de ses activités sur l'environnement. Cela va dépendre des différentes perspectives dans lesquelles l'entreprise compte agir, étant donné l'importance des impacts par rapport à celles-ci, qui peuvent être locale, régionale ou globale. La réglementation en vigueur dans la zone d'exploitation constitue également un des paramètres importants et déterminants pour le choix de la perspective dans laquelle il faut agir. La résolution du problème à ce niveau peut dès lors se faire à partir d'une analyse multicritère des résultats de l'ACV obtenus précédemment.

4.2 Optimisation de la prise de décision au moyen de l'analyse multicritère

4.2.1 *Détermination des critères et des options*

Le choix des critères et des options est fondé sur l'importance qu'on attribue aux différents impacts suivant l'échelle géographique à laquelle on se réfère. Ainsi, les échelles locale, régionale et globale

constituent les critères sur lesquels la prise de décision devra se focaliser. Les options dans cette analyse sont assimilées aux différentes catégories d'impacts choisies pour l'étude. Ces options sont au nombre de six à savoir : le potentiel de réchauffement climatique (GWP), le potentiel d'acidification (AP) ; le potentiel d'eutrophisation (EP), la formation photochimique de la couche d'ozone (POF), l'écotoxicité terrestre (Ter.Ec), le potentiel de toxicité humaine (HTP). Elles font ainsi l'objet d'une comparaison par paires suivant la méthode AHP et le critère sur lequel on s'appuie.

4.2.2 Evaluation comparée des critères et options, détermination des priorités

Cette évaluation des critères et options porte sur la construction des matrices carrées qui répondent aux différents critères de référence. L'échelle numérique d'attribution des valeurs aux différentes options va de 1 à 6 pour caractériser le degré d'importance relative d'une option par rapport à une autre. Ce classement se fait en référence à l'échelle de perception des dommages pouvant être engendrés par les différents impacts. Pour cela on suppose que les émissions de gaz à effet de serre à l'échelle d'un site industriel vont contribuer au réchauffement planétaire engendrant des conséquences beaucoup plus globales. Par contre les émissions de substances toxiques pour l'homme et les écosystèmes porteront atteinte à l'environnement de façon beaucoup plus locale.

Ainsi, à l'échelle globale, l'ordre d'importance des catégories d'impacts est le suivant : GWP > AP > EUT > POF > HTP > Ter. Ec. Ceci permet d'obtenir la matrice du tableau 14 ci-après.

Tableau 14 Matrice AHP à l'échelle globale

Echelle globale	GWP	AP	EP	POF	HTP	Ter.Ec.	POIDS
GWP	1	2	3	4	5	6	0,38
AP	1/2	1	2	3	4	5	0,25
EP	1/3	1/2	1	2	3	4	0,16
POF	1/4	1/3	1/2	1	2	3	0,10
HTP	1/5	1/4	1/3	1/2	1	2	0,07
TE	1/6	1/5	1/4	1/3	1/2	1	0,04
SOMME	2,45	4,28	7,08	10,83	15,50	21,00	1,00

Source : Auteur

A partir des poids obtenus on note qu'à l'échelle globale le changement climatique doit être la préoccupation majeure. La toxicité terrestre ainsi que la toxicité humaine ne suscitent aucune prise en compte lorsqu'on se situe à l'échelle globale.

A l'échelle régionale par contre on a l'ordre suivant : AP, EP > POF, HTP > TE > GWP. L'acidification et l'eutrophisation ont la même importance, de même que la formation photochimique de la couche d'ozone et la toxicité humaine. L'analyse hiérarchique des processus à cette échelle est présentée dans le tableau 15 ci-après.

Tableau 15 Matrice AHP à l'échelle régionale

Echelle Régionale	GWP	AP	EP	POF	HTP	Ter.Ec.	POIDS
GWP	1	1/6	1/6	1/4	1/4	1/2	0,04
AP	6	1	1	3	3	5	0,32
EP	6	1	1	3	3	5	0,32
POF	4	1/3	1/3	1	1	3	0,13
HTP	4	1/3	1/3	1	1	3	0,13
TE	2	1/5	1/5	1/3	1/3	1	0,06
SOMME	23,00	3,03	3,03	8,58	8,58	17,50	1,00

Source : Auteur

Les poids obtenus à l'échelle régionale (Tableau 15) permettent à l'entreprise si elle se situe à cette échelle, de se préoccuper beaucoup plus de l'eutrophisation et de l'acidification.

A l'échelle locale enfin, l'ordre est le suivant : HTP > Ter.EC > POF > EP > AP > GWP. Les poids des différentes catégories d'impacts à l'échelle locale sont présentés dans le tableau 16.

Tableau 16 Matrice AHP à l'échelle locale

Echelle Locale	GWP	AP	EP	POF	HTP	Ter.Ec.	POIDS
GWP	1	1/2	1/3	1/4	1/6	1/5	0,04
AP	2	1	1/2	1/3	1/5	1/4	0,07
EP	3	2	1	1/2	1/4	1/3	0,10
POF	4	3	2	1	1/3	1/2	0,16
HTP	6	5	4	3	1	2	0,38
TE	5	4	3	2	1/2	1	0,25
SOMME	21,00	15,50	10,83	7,08	2,45	4,28	1,00

Source : Auteur

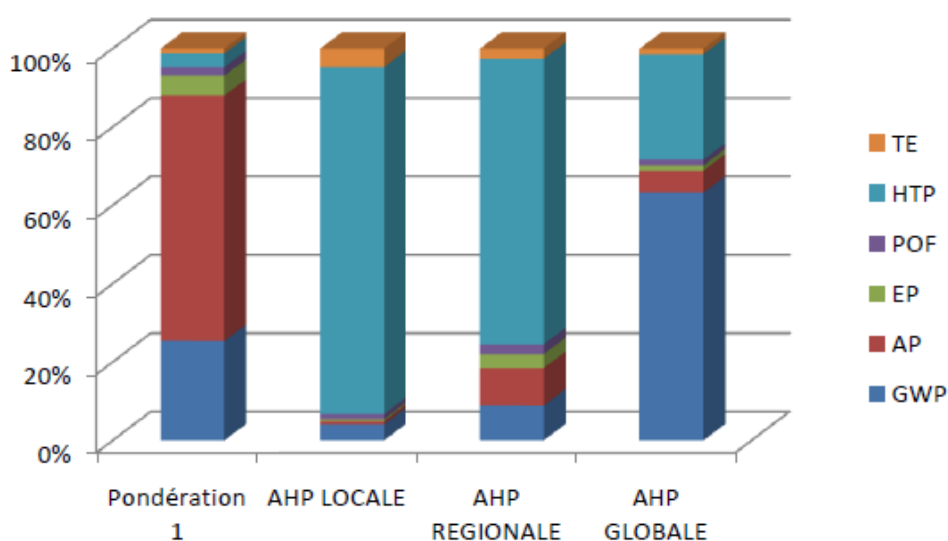
A cette échelle par ailleurs, l'entreprise devra se concentrer sur la réduction des émissions qui contribuent à la toxicité humaine et à la toxicité terrestre.

4.2.3 Synthèses des priorités, Choix des options et interprétations

D'après la figure 9, lorsque les impacts ont la même importance, ainsi que dans les perspectives locale et régionale, la toxicité humaine est la préoccupation majeure à laquelle l'entreprise devra prendre des initiatives concrètes pour limiter ses dommages sur l'environnement. Il est également important de relever que la toxicité humaine occupe une grande importance dans toutes les perspectives allant du niveau de référence au niveau global. Dans l'ensemble, on note une variation de la contribution des différentes catégories d'impacts à l'impact global dans toutes les perspectives.

En définitive, la différence observée à la figure 9 entre les différentes contributions des catégories d'impacts dans les différentes perspectives a une influence sur le choix des émissions à réduire pour améliorer les performances environnementales. Bien que la toxicité humaine soit importante dans les trois perspectives, l'entreprise minière qui produit le minerai de fer brut doit réduire également les émissions qui contribuent à la toxicité terrestre et au réchauffement climatique au niveau local. Dans une perspective régionale par contre, outre la réduction des émissions contribuant à la toxicité humaine, elle devra également agir au niveau de la réduction des émissions qui contribuent à l'acidification, à l'eutrophisation et à la toxicité terrestre. Au niveau global par ailleurs, elle devra se focaliser en priorité sur les émissions de gaz à effet de serre, ainsi que sur les émissions qui contribuent à l'acidification.

Figure 9 Contribution relative des catégories d'impacts selon les perspectives



Source : Auteur

4.2.4 Détermination de la cohérence des résultats

Les résultats des ratios de cohérence montrent qu'à l'échelle globale l'analyse hiérarchique des processus n'est pas cohérente (RC=0,11) alors que dans les perspectives locale (RC= 0,02) et régionale (RC=0,02) elle est très cohérente (RC<10%). L'incohérence des résultats dans la perspective globale pourrait s'expliquer par le rapprochement des valeurs de jugement entre le potentiel de réchauffement climatique et l'acidification. Ceci signifie que des révisions doivent être faites sur le jugement relatif à l'échelle globale.

4.3 Proposition de mesures en faveur de la protection de l'environnement en contexte minier au Cameroun

L'amélioration des performances environnementales des entreprises minières camerounaises au moyen des outils d'évaluation environnementale et de prise de décision tels que l'ACV et l'AMC passe

nécessairement par des mesures à prendre tant de la part du gouvernement camerounais et des entreprises minières elles mêmes, mais aussi des organisations de la société civile. Les tableaux 17 et 18, permettent de ressortir les principaux éléments dont la prise en considération et la mise en œuvre pourraient constituer une avancée considérable en matière de gestion et de protection de l'environnement dans le contexte minier Camerounais.

4.3.1 Au niveau gouvernemental

Les mesures devant être prises par les autorités compétentes afin de protéger l'environnement minier sont consignées dans le tableau 17. Elles touchent aux aspects techniques, réglementaires et financiers qui pourraient inciter les entrepreneurs du secteur minier à une prise en compte sérieuse de l'environnement dans leurs activités.

4.3.2 Au niveau des entreprises minières

Les mesures que devront prendre les entreprises minières en activité au Cameroun pourraient s'inscrire selon leurs aspirations, dans une stratégie de management environnemental. Toutefois, la prise en compte du dispositif contraignant prévu par la législation en matière de protection d'environnement devra être systématique. Par ailleurs, les différentes négociations et accords internationaux sur l'environnement ainsi que les revendications des ONG et de la société civile, pourraient constituer une sorte de pression morale objective pour ces entreprises. Ainsi, les mesures proposées pour une meilleure gestion des émissions et des pollutions à l'échelle de l'entreprise concernent beaucoup plus la mise en place des indicateurs pertinents, capables de fournir des informations sur les performances environnementales au cours du temps. Ces indicateurs doivent être sélectionnés de manière à présenter de façon compréhensible et utilisable les données et informations, qualitatives et surtout quantitatives. Ils doivent également être présents au niveau des unités de l'exploitation ainsi qu'au niveau de la coordination de l'entreprise. Toutes ces mesures doivent s'accompagner de l'usage des technologies propres et respectueuses de l'environnement. Les propositions de mesures concrètes à l'endroit de ces entreprises sont consignées dans le tableau 18.

4.3.3 Au niveau des acteurs non gouvernementaux

Les acteurs non gouvernementaux qui œuvrent au niveau national ou local, devront se mettre à jour en permanence par rapport aux impacts environnementaux engendrés par les activités minières, afin de mieux préparer leur plaidoyer en matière de risques et pollutions. Ainsi elles devront être capables de dénoncer ou d'attirer l'attention des parties concernées sur les effets observés des activités sur l'environnement. Elles doivent également sensibiliser les populations locales et les tenir informées des enjeux environnementaux des activités minières.

Tableau 17 Recommandations à l'endroit du gouvernement

Entité compétente	Objectif général	Objectifs spécifiques	Activités ou tâches	Outils	Indicateurs	Echéances
Gouvernement : Actions coordonnées des Ministères compétents et des services décentralisés	Gestion et protection de l'environnement dans les exploitations minières en activité	-Améliorer le dispositif réglementaire	- Signer des décrets d'application des mesures prises dans le code de l'environnement. - Etablir des normes fiables et spécifiques au contexte minier et les actualiser en permanence -Etablir des directives en matière de protection des sols, de l'air...	-S'inspirer des réglementations et des normes des pays ayant un lourd passé en matière d'exploitation minière. - S'inspirer des résultats d'analyse de cycle de vie des mines similaires -Travailler en collaboration avec les entrepreneurs du secteur	Recueil de textes et normes + guide de bonnes pratiques relatives au secteur minier	Avant l'entrée en activité des entreprises minières
		Renforcement des capacités techniques du personnel des administrations compétentes en matière de protection des composantes de l'environnement	- Formations périodiques du personnel par des enseignants compétents -Apprentissage des techniques d'évaluation environnementale -Apprentissage des mesures des concentrations de substances toxiques dans l'eau, l'air, les sols -Apprentissage des techniques d'inventaires des émissions et extractions et de l'analyse multicritère	- S'inspirer de la notion de cycle de vie à l'échelle de la mine pour mieux faire les inventaires - Logiciels d'ACV -Travailler en collaboration avec les entrepreneurs du secteur	Nombre de personnels formés et prêts à se déployer sur le terrain en tenant compte des différentes exploitations minières	Avant le début effectif des activités d'exploitation industrielles des mines.
		Contrôle et surveillance des activités d'exploitation minière en collaboration avec les entreprises minières en activité	-Organiser les missions de contrôle sur le terrain de façon périodique et séquentielle -mesurer les écarts de concentrations des substances visées par les normes et la réglementation dans l'eau, l'air et sol -Faire une fiche d'inventaire des émissions et extractions à évaluer continuellement et à actualiser en permanence	-Tableau de bord -Analyse de cycle de vie -Logiciel conçu et adapté au contexte	- Données d'inventaires actualisées -Base de données fournies et actualisées - Gestion facile des modifications liées aux émissions et extractions enregistrées au niveau de l'entreprise - Déclarations	En permanence

Entité compétente	Objectif général	Objectifs spécifiques	Activités ou tâches	Outils	Indicateurs	Echéances
					périodiques des émissions par les entreprises	
		Appliquer les mesures coercitives	- Vérification permanente des émissions et extractions et de leur impact sur l'ensemble des émissions puis confrontation à la réglementation et aux normes en vigueur	- Normes et inventaires des émissions	-Nombre de missions de contrôle et de sanctions enregistrées	En permanence
		Information des populations riveraines sur les risques liés aux activités des entreprises minières	- Campagnes d'informations, de recueil des doléances et de sensibilisation des populations -Concevoir des messages audio et vidéo sur les risques et impacts liés aux activités minières - Constituer un document d'information directement accessible au public et mis à jour régulièrement	-Affiches, supports audio et vidéo	- Nombres de campagnes - Volume des doléances des populations - Mesures d'atténuation prises	En permanence, et à un rythme raisonnable
		Incitation des investissements en matière de dépollution		-Renforcer les lois	Des entreprises de dépollution sont créées	En permanence
		Incitations financières	- Alléger pendant un certain temps, la fiscalité afin de permettre aux entreprises minières de mettre en œuvre leur dispositif de gestion de l'environnement - Allouer un budget conséquent pour la mise en œuvre de ces mesures			

Source : Auteur

Tableau 18 Recommandations à l'endroit des entreprises minières

Entité compétente	Objectif général	Objectifs spécifiques		Activités ou tâches	Outils	Indicateurs	Echéances	Processus unitaire concerné
		Mise en place d'une fonction environnement et d'un programme environnemental		-Préparation d'une liste d'impacts potentiels -Etablissement des objectifs et cibles -Etablissement des indicateurs -Situation environnementale du site	- Normes -Exigences réglementaires	Document contenant le programme	Avant le début des activités	Tous les processus unitaires
Entreprises minières en activité	Protection de l'environnement en contexte minier	Protection de l'air		-Mesures des émissions de gaz et particules, mise à jour des données - Evaluation des écarts à la normale	-ACV + dispositif technique	-Bases de données actualisées sur les émissions de gaz et les particules - Mesures prises pour corriger les écarts	De façon séquentielle durant la vie de la mine	Tous les processus unitaires
		Protection des eaux	Mesure des concentrations des substances rejetées et mise à jour des données	- Contrôle de l'acidité et de l'alcalinité des eaux par des prélèvements (mesures des concentrations des sulfates - Evaluation des écarts à la normale	-ACV + dispositif technique	-Bases de données actualisées sur les émissions de gaz et les particules - Mesures prises pour corriger les écarts	De façon séquentielle durant la vie de la mine	Stockage des résidus miniers et usines de traitement des effluents, usine de traitement du minerais
				-Contrôle des lixiviats pour mesures des concentrations de métaux - Evaluation des écarts à la normale	-ACV + dispositif technique	-Fiches de contrôle et données actualisées - Mesures prises pour corriger les écarts	Durant le cycle de vie de la mine	Extraction et usine de traitement des minerais et de traitement des eaux
				-Contrôle des MES (PM ₁₀ , ...) - Evaluation des écarts à la normale	-ACV + dispositif technique	-Fiches de contrôle et données actualisées - Mesures prises pour corriger les écarts	Durant la vie de la mine	Extraction et usine de traitement des minerais

Entité compétente	Objectif général	Objectifs spécifiques	Activités ou tâches	Outils	Indicateurs	Echéances	Processus unitaire concerné
					écarts		
			Recyclage des eaux	-ACV -AMC - + dispositif technique	-Effluents traités -Données actualisées	Durant la vie de la mine	Usine de traitement des effluents
			- Contrôle des effluents pour mesures d'ammoniac - Evaluation des écarts à la normale	- ACV+ dispositif technique	- Fiches de contrôle - Mesures prises pour corriger les écarts	Durant la vie de la mine	Pendant le sautage au niveau de l'extraction
		Protection des sols	- Mesure des concentrations des sols en métaux lourds - Evaluation des écarts à la normale	- ACV + dispositif technique	-Fiches de contrôle actualisées	Durant la vie de la mine	- Mine et extractions -dépôts des stériles et résidus miniers -Station de traitement des boues d'épuration
		Lutte contre les nuisances	Contrôle des décibels, des odeurs		Peu ou pas de bruits, peu ou pas d'odeurs	Durant la vie de la mine	Tous les processus unitaires
		Respect de la réglementation	- Analyse réglementaire - Comparaison des mesures aux normes réglementaires et aux normes de l'entreprise	- Normes -Textes, lois	-Nombre de sanctions enregistrées -Recueil de textes réglementaires	Pendant toute la vie de la mine	Tous les processus unitaires et procédés
		Information du personnel sur les orientations en matière d'environnement	- Préparation d'un programme d'éducation relative à l'environnement	-Panneaux, affiches, campagnes de sensibilisation		En permanence	
		Information des populations locales	- Préparer les supports, placer des panneaux -Organiser des campagnes de sensibilisation et d'information	-Panneaux, affiches et nombre de campagnes effectuées	-Nombre de campagnes de sensibilisation organisées	En séquences sur la durée de l'exploitation	Tous les processus unitaires et les flux émis

Source : Auteur

Il ressort de ce chapitre que l'ACV et l'AMC constituent deux outils dont la combinaison est favorable à une meilleure analyse des performances environnementales en contexte minier et une meilleure prise de décision pour toutes les parties prenantes. Au regard de la demande mondiale des matières premières qui ne cesse d'être croissante, le Cameroun comptera ainsi parmi les grands fournisseurs dans les années à venir. Cependant il a intérêt à mettre en œuvre le développement durable dans ce secteur pour assurer à long terme non seulement une prospérité économique, mais aussi et surtout une bonne protection de l'environnement pour une amélioration des conditions de vie de ses populations. Ceci se fera donc par un triple engagement des autorités compétentes, des entreprises minières et des organisations de la société civile d'une part et par la mise en œuvre des nouveaux instruments de gestion de l'environnement que sont l'ACV et l'AMC.

Conclusion générale

La gestion de l'environnement en contexte minier en Afrique, demeure une problématique sur laquelle il va falloir s'investir davantage afin de limiter ou d'enrayer les impacts environnementaux qui en découlent. Il s'agit des impacts liés aux activités minières qui ont été enregistrés sur le continent au cours de cette dernière décennie, avec pour corollaire d'importants dommages tant sur l'environnement que sur la santé des populations locales. Cela montre que malgré l'entrée en vigueur des réglementations plus ou moins flexibles, l'exploitation minière en Afrique reste entachée de plusieurs problèmes environnementaux qui entraînent des dommages énormes laissant croire que le secteur minier africain est resté en marge du développement durable. Les dommages sont caractérisés par l'épuisement des ressources naturelles et la recrudescence des maladies liées aux multiples pollutions qu'engendrent les activités, ceci au sein d'une population plus que jamais en proie à la paupérisation.

Le Cameroun, souhaite selon son document de stratégie de la croissance et de l'emploi de l'année 2009, entrer dans le cercle des pays dit à revenus intermédiaires. Il compte pour cela énormément sur son secteur minier dont les richesses se sont avérées très importantes, sans oublier que la recherche de nouveaux gisements se poursuit. C'est pour pouvoir contribuer à une meilleure gestion de l'environnement dans le contexte minier que nous avons pensé qu'il était important de s'approprier des outils et des méthodes permettant de le faire en toute quiétude en espérant obtenir des résultats encourageants. Nous avons pensé qu'une des possibilités pouvant permettre de réduire les impacts environnementaux des exploitations minières pouvait être la mise en relief des performances environnementales afin que les entreprises entament leurs activités minières dans cette logique. C'est la raison pour laquelle notre étude s'est appesantie sur une étude de cas d'exploitation d'une mine de fer. A la question « comment combiner l'analyse de cycle de vie et l'analyse multicritère pour une bonne évaluation des impacts environnementaux susceptibles de survenir dans une exploitation minière ? », nous avons apporté notre réponse en procédant à l'analyse de cycle vie appliquée à la production du minerai de fer, dont les résultats ont permis de procéder à une analyse multicritère par la méthode AHP afin d'orienter le processus de prise de décision sur les types de pollutions qu'il va falloir enrayer ou limiter. Il est toujours important de revenir sur le fait que l'importance des impacts environnementaux dépend non seulement des dommages qu'ils peuvent engendrer mais aussi de l'échelle géographique dans laquelle on se situe et aux réglementations en vigueur. Aussi avons-nous dans le cadre de la revue de la littérature associé les impacts environnementaux aux échelles auxquelles leur prise en compte peut être importante. L'échelle d'importance d'un impact peut être globale, régionale ou locale.

L'analyse du cycle de vie de la mine de fer s'est appuyée sur les inventaires des émissions dans l'eau, les sols et dans l'air, liées à la production d'une tonne de minerai de fer. Ces données d'inventaires des émissions ont été obtenues à travers la base de données du logiciel Gabi4 sur lequel nous avons effectué nos travaux durant le stage de mise en situation professionnelle à l'école des Mines de Nancy. La caractérisation des impacts environnementaux s'est faite au niveau dit intermédiaire selon la norme

ISO 14040 qui régit l'ACV. Les catégories d'impacts retenues pour cette caractérisation des impacts de la production de la tonne de minerai de fer sont : le réchauffement climatique global, le potentiel d'eutrophisation, le potentiel d'acidification, l'écotoxicité terrestre et le potentiel de toxicité humaine. Le choix de ces catégories est fondé sur les résultats des inventaires des émissions obtenus. Les scores d'impacts des différentes catégories d'impacts ainsi que leur normalisation ont été obtenus à partir des formules et des calculs effectués à cet effet.

A la suite de la normalisation, nous nous rendons compte que, si les impacts ont la même importance, c'est - à - dire à l'exclusion des considérations globale, locale et régionale, la production d'un kilogramme de minerai de fer brut engendre un potentiel de toxicité humaine élevé et une contribution assez considérable au réchauffement climatique global. L'écotoxicité terrestre ainsi que l'acidification du milieu méritent également une attention particulière au regard de leur importance relative qui n'est pas des moindres.

Les scores normalisés des impacts ne pouvant pas contribuer directement à une prise de décision dans l'optique de choisir le type d'émission sur lesquels les efforts doivent s'orienter, nous avons procédé à une analyse multicritère en utilisant la méthode d'hiérarchisation des processus(AHP). Le choix de cette méthode s'est appuyé sur le fait qu'elle facilite le jugement des critères et options par paires en tenant compte de la transitivité (c'est-à-dire, si $a > b$ et $b > c$ alors $a > c$).

A l'échelle locale, il ressort après pondération des impacts à travers la méthode AHP, que le potentiel de toxicité humaine lié à la production du kilogramme de minerai de fer est de loin plus important par rapport aux autres catégories d'impacts. Cela montre que si l'entreprise prend sa décision en se situant dans la logique d'une limitation des impacts environnementaux de ses activités dans une perspective locale, elle va beaucoup œuvrer pour limiter les émissions responsables de ce potentiel de toxicité humaine. Elle devra également se pencher sur la toxicité terrestre qui est importante à l'échelle locale et qui enregistre un score considérable par rapport aux autres catégories d'impacts.

Dans une perspective régionale, les résultats obtenus montrent que le potentiel de toxicité humaine a un score très élevé par rapport à toutes les autres catégories d'impacts. De prime abord l'entreprise serait tentée de prendre des initiatives pour limiter les émissions allant dans ce sens. Pourtant à cette échelle, cette catégorie d'impact est moins importante que l'acidification (AP) et l'eutrophisation (EP). La prise de décision dans ce cas doit prioriser les impacts qui pourraient engendrer des dommages pouvant être perceptibles à une échelle régionale. Ainsi, l'entreprise aura intérêt à se focaliser sur les émissions pouvant entraîner une augmentation des potentiels d'eutrophisation et d'acidification bien que les écarts entre leurs scores respectifs et le score du potentiel de toxicité humaine soient très importants.

Si l'on se situe plutôt à l'échelle globale, la priorité pour l'entreprise en matière d'amélioration de ses performances environnementales sera la limitation des émissions de gaz à effet de serre qui contribuent le plus au fort potentiel de réchauffement global.

La combinaison de l'analyse de cycle de vie et de l'analyse multicritère pour une meilleure appréciation des impacts environnementaux des activités minières est une des solutions pertinentes pouvant contribuer avec efficacité à une amélioration des performances environnementales des entreprises du secteur. Cependant sa mise en œuvre au Cameroun demande un certain nombre d'engagements des autorités gouvernementales, d'une volonté manifeste des entreprises minières elles-mêmes et d'une conscientisation des populations grâce aux organisations de la société civile. Pour le gouvernement camerounais, il va falloir mettre sur pieds des incitations réglementaires fortes pouvant susciter l'attention des entreprises minières sur la protection de l'environnement à travers leurs activités. Le gouvernement devra également renforcer ses capacités sur le plan technique et rendre les administrations vouées au secteur minier, véritablement opérationnelles sur le terrain. Pour les entreprises, elles devront intégrer dans leur production un système de management pouvant être couplé à l'analyse de cycle de vie et aux analyses multicritères pour optimiser leur choix et limiter au maximum les pollutions diverses pouvant découler de leurs activités. Par ailleurs la vigilance des populations et leur sensibilisation doivent être de mise afin de contribuer aux pressions sur les autorités gouvernementales et les entreprises minières en matière de protection de l'environnement.

Compte tenu des résultats obtenus dans cette étude, le souhait serait d'appliquer la méthodologie utilisée à un cas sur le terrain, afin d'apprécier davantage les goulots d'étranglement de cette approche. Bien que les objectifs visés dans cette étude aient été atteints, nous ne devons pas occulter le fait que les données nécessitent encore des ajustements. Des affectations des émissions à des processus unitaires précis du système de production du minerai de fer doivent être faites pour parvenir à des résultats plus probants. Aussi il serait également important de s'intéresser aux relations entre la roche mère du minerai et les émissions qu'elle pourrait engendrer lors de son exploitation. Cependant, il serait utopique de penser que, seule la maîtrise des impacts au moyen des indicateurs de condition environnementale permettra d'assurer une bonne gestion de l'environnement en contexte minier. Pour y parvenir, il serait souhaitable pour les entreprises de prendre en compte les indicateurs de performance de management et les indicateurs de performance opérationnelle.

5 Références bibliographiques

- André P., Delisle C., Reveret J.P.** - *L'évaluation des impacts sur l'environnement: Processus, acteurs et pratiques*. Montréal : Presses internationales polytechniques. ISBN 2-553-01132-6. **2003**. pp. 519.
- Banque Africaine de développement (BAD).** - *Rapport sur le développement en Afrique*. Economica. ISBN 2-7178-5053-8. **2005**. p. 265.
- Basset-Mens C.** - *Proposition pour une adaptation de l'analyse de cycle de vie aux systèmes de production agricole*. Mise en oeuvre pour l'évaluation environnementale de la production porcine. [Thèse]. Institut National de Recherche Agronomique. **2005**. p. 244..
- Belem G., Revéret J.P., Gendron C.** - *L'analyse du cycle de vie comme outil de développement durable*. ESG-UQAM. Québec, Canada : Bibliothèque Nationale du Québec, ISBN 2-923324-29-3. **2005**.
- Belhani M.** *Analyse de cycle de vie exergétique de systèmes de traitement des eaux résiduaires*. Thèse de Doctorat de l'INPL. Nancy, France : s.n., **2008**. pp. 546.
- Benoit V, Rousseaux P.** - *Aid for aggregating the impacts in life cycle assessment*. International Journal of Life Cycle Assessment, Vol. 8. **2003**. pp. 74-82.
- Bouquin H.** – *Le contrôle de gestion*. Presses Universitaires de France. Paris. 1986.
- Brodhag C., Breuil F., Gondran N., Ossama F.** - *Dictionnaire du développement durable*. AFNOR. ISBN: 2-12-486933-7. **2007**. pp.283.
- Brundtland, Gro Harlem.** - *Notre Avenir à Tous*. Rapport de la commission mondiale sur l'environnement et le développement. Oxford University Press, **1987**.
- Caron M.A., Boisvert H., Mersereau A.** – *Le contrôle de gestion environnementale ou l'éco-contrôle : pertinences des outils traditionnels*. Actes du 28^{ème} congrès de l'Association Francophone de Comptabilité. Poitiers. Mai, **2007**.
- CENECO.** - *DIXECO de l'environnement pour comprendre les échanges entre l'homme et son milieu*. Editions ESKA. **1995**. p. 262.
- CITEPA.** - *La pollution atmosphérique en bref*. www.citepa.org/pollution/phenomenes, consulté le **02 Décembre 2011**
- CML.** - *Impact assessment april 2004* (excel spreadsheet). Leiden. <http://www.leidenuniv.nl/>, consulté le **15 Janvier 2010**.
- CNUCED.** - *Évolution récente des principaux marchés de produits de base: Tendances et contraintes*. Secrétariat général des nations unies, TD/B/C.I/MEM.2/13. **2011**.
- Cooper C.D. & Alley, F.C.** - *Air pollution control: A Design Approach*. Illinois : waveland Press, INC., Second Edition. **1994**.

CRIIRAD, Greenpeace. - *Remarks on the radiological situation in the vicinity of the uranium mines operated by SOMAIR and COMINAK (Subsidiaries of Areva) in northern Niger*. 10-09. **2010**.

DSCE. - *Document de stratégie pour la croissance et l'emploi*. MINPLADAT/MINEFI. **2009**. 167 pages.

Durucan S., Korre A., Munoz M.G. - *Mining life cycle modelling: a cradle to gate approach to environmental management in the minerals industry*. Elsevier, Journal of cleaner production, Vol. 14, **2006**. pp. 1057-1070.

Elichegaray C., Colosio J., Bouallala S. - *Bilan de la pollution photochimique observée en France au cours de l'été*. France . ADEME. **2003**.

Enrico.B. - *Analyse du cycle de vie, Réalisation de l'inventaire*. Techniques de l'ingénieur. Tl g5510.

FFEM. - *Protection de la couche d'ozone stratosphérique*. Secretariat du FFEM. AFD/TSR. www.ffem.fr, consulté le **09 Janvier 2011**.

GIEC. 2007. - *Bilan des changements climatiques: Contributions des groupes de travail I, II et III au quatrième rapport d'évaluation du Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat*. Genève. **2007**. p. 103.

Grisel L., Osset P. - *L'analyse de cycle de vie d'un produit ou d'un service*. AFNOR. ISBN 978-2-12-465151-1. **2008**. p. 357.

Hau L.J.B.S. - *Integrating life cycle assessment, exergy and emergy analyses*. Graduate School of the Ohio State University. Master Thesis. 2002.

Henri J.F., Giasson A. – *Measuring environmental performance: a basic ingredient of environmental management*. CMA Management. August-September **2006**. Pp.24-28.

Hermann B.G., Kroeze C., Jawjit W. - *Assessing environmental performances by combining life cycle assessment, multicriteria analysis and environmental performance indicators..* Elsevier. Journal of Cleaner Production. Vol. 15. **2006**. pp. 1787-1796.

ISO 14001. – *Système de management environnemental – Exigences et lignes directrices pour son utilisation*. Paris : AFNOR. **2004**.

ISO 14031. – *Management environnemental – Evaluation de la performance environnementale*. Lignes directrices. AFNOR. Paris. **2000**.

ISO14040. - *Life cycle assessment-General principles and framework*. International Organisation for Standardization, Environmental management. **1997**. pp. 17.

ISO14041b. - *International Organisation for Standardization, Environmental Management*. Life cycle Assessment-Inventory Analysis. Geneva : 1999.

Janicot L. - *Les systèmes d'indicateurs de performance (IPE), entre communication et contrôle*. Comptabilité. Contrôle - Audit. Tome 13, Vol. 1. **2007**. Pp. 47-68.

- Jensen A.A. et al.** - *Life Cycle Assessment (LCA): a guide to approaches, experiences and information sources*. European 140 Environment Agency. Copenhagen, Denmark : Office for official publications, 1998.
- Jolliet O., Saade M., Crettaz P.** - *Analyse du cycle de vie*. Presses Polytechnique et Universitaire Romandes, 2005.p. 209.
- Khalifa K.** - *Analyse de cycle de vie, Problématique de l'évaluation des impacts*.Technique de l'ingenieur. Traité de génie industriel , G5610. 2002. pp10.
- Khennas S.** - *Industrialisation, Ressources minières et énergie en Afrique*. Editions CODESRIA. Dakar. 1993.pp.348.
- Lafontaine J.P.** – *L'implantation des systèmes d'information environnementale : domaine en quête de théories*. Actes du 19^{ème} congrès de l'Association Française de Comptabilité, Vol 2. 1998. Pp. 884-899.
- Lauwerys R., Haufroid V., Hoet P., Lison D.** - *Toxicologies industrielle et intoxications professionnelles*. Elsevier , MASSON SAS. 2007.pp. 1216.
- Le Gall V.** *Management environnemental*. Techniques de l'ingénieur,Traité de Génie Industriel, p. 8. TI-4 130 .
- Lebas L.** - *Impacts de l'exploitation minière sur les populations locales et sur l'environnement dans le Haut-Ogooue*.http://brain-forest.org/img/Impacts_exploitation_miniere_HautOgooue.pdf.Brainforest, Août 2010. Consulté le 19 Novembre 2010.
- Lebas M.** - Oui, il faut définir la performance. *Revue Française de comptabilité*. Juillet-Août 1995. p.66-71.
- Macoun, Guillermo A. Mendoza P.** -*Application de l'analyse multicritère à l'évaluation des critères et indicateurs. Manuel de critères et indicateurs pour la gestion durable de forêts*. CIRAD-CIFOR. 2000.
- Manjena S.J., Brent A.C.** - *Application of a cycle impact assessment framework to evaluate and compare environnementale performances with economics values of supplied coal products..* Journal of cleaner production. Elsevier, Vol. 14. 2006. pp. 1071-1084.
- Nations Unies.** - *Rapport d'examen Africain sur l'exploitation minière* . Conseil économique et social, Nations Unies. Addis-Abeba – Ethiopie. 2009.
- OCDE** - *Bonnes pratiques pour les études de l'impact sur l'environnement exercé par les projets de développement*. Comité d'aide au développement, lignes directrices sur l'environnement et l'aide N°1. 1992. 18 pages.
- Pinet C.** - *10 clés pour réussir sa certification QSE*. AFNOR. ISBN 978-2-12-465199-3. 2009. p. 354.
- PNUE.** - *L'Avenir de l'environnement en Afrique*. Programme des nations unies pour l'environnement. 2006.

- Reid C., Bécaert V., Aubertin M. et Ralph K.R., Deschênes L.** - *Life cycle assessment of mine tailings management in the minerals industry in Canada*. Elsevier, Journal of Cleaner Production. Vol. 17, **2009**. pp. 471- 479.
- Renaud D.** - *Le système de management environnemental comme moyen de contrôle de la déclinaison et de l'émergence des stratégies environnementales*. Thèse de l'université de Poitiers-CEREGE. **2009**. Pp.604.
- Renou S.** - *Analyse de cycle de vie appliquée au traitement des eaux usées*. Thèse de Doctorat. Nancy, INPL. **2006**.
- Reveret J.P.** - *Investissement minier et développement. L'exploitation de l'ilménite dans la région de Tolagnaro*. Etudes rurales. Vol. 02, 178, **2006**. pp. 213-228.
- Rousseaux P.** - *Analyse du cycle de vie (ACV)*. Technique de l'ingénieur-Traité de Genie Industriel. TI D5500.
- Rousseaux P.** - *Analyse de cycle de vie, Evaluation des impacts,,* Technique de l'ingénieur, Traité de Genie Industriel, **1998**. G5605 pp10.
- Ryding.S.O.,** - *Le contrôle de l'eutrophisation des lacs et des reservoirs*. Edition Masson. ISBN-2-225-8439-7. **1993**. p. 294
- Saaty T.** - *Decision making for leaders : The analytic hierarchy process in a complex world*. Pittsburgh, PA. RWS Publications. **1995**.
- Saaty, T.L.** - *Décider face à la complexité : Une approche analytique multicritère d'aide à la décision*. ESF. **1984**. pp. 231.
- Sciama. Y.** - *Le changement climatique, une nouvelle ère sur la terre* - Petite encyclopédie. Larousse, **2010**. p. 128..
- Torquebiau E.** - *Cours Agriculture durable et agro-foresterie*. Agriculture durable et agro-foresterie. Alexandrie, Egypte , **2010**.
- Tyteca D.** – *Problématique des indicateurs environnementaux et développement durable*. Congrès de la Société de l'Industrie Minérale, Liège. Octobre **2002**.
- UNFCCC.** - *Outcome of the work of the Ad Hoc Working Group on long-term Cooperative Action under the Convention*. Draft decision -/CP.16, **2010**. http://unfccc.int/files/meetings/cop16_lca.pdf, consulté le 20 Avril 2011.

6 Liste des illustrations

Figure 1	Du développement au développement durable : évolution de la hiérarchie des enjeux	8
Figure 2	Cycle de vie d'un système selon l'approche <<du berceau à la tombe>>	25
Figure 3	Cadre méthodologique global de l'étude.....	30
Figure 4	Cadre méthodologique d'une analyse de cycle de vie.....	30
Figure 5	Ensemble des processus unitaires d'un système	31
Figure 6	Hiérarchisation du problème	33
Figure 7	Système de production d'une mine adapté à la production du minerai de fer	38
Figure 8	Impacts potentiels Normalisés de la production d'un kilogramme de minerais de fer	43
Figure 9	Contribution relative des catégories d'impacts selon les perspectives	46
Figure 10	Indice des prix des minéraux, des minerais et des métaux, moyennes mensuelles, janvier 2009-novembre 2010(En dollars courants, base 2000 = 100).....	68
Figure 11	Arbre à processus du système de la production de l'aggloméré	70
Figure 12	Arbre à processus du système de production de la fonte	71
Figure 13	Arbre à processus du système de production du coke	71
Figure 14	Implémentation du système de production de la fonte sous Gabi 4	72
Figure 15	Implémentation du système de production de l'aggloméré sous Gabi 4.....	72
Figure 16	Implémentation du système de production de fonte	73
Figure 17	Implémentation du système de production du coke sous Gabi 4.....	73
Figure 18	Impacts environnementaux de la préparation du coke	75
Figure 19	Impacts de la production de fonte au niveau du haut-fourneau	76
Figure 20	Impacts environnementaux de la production de l'aggloméré.....	76
Figure 21	Impacts environnementaux du système global	77
Figure 22	Impacts globaux de la filière fonte.....	77

7 Liste des tableaux

Tableau 1	Principales ressources minières de l'Afrique en 2005	9
Tableau 2	Matrice de la performance environnementale.....	15
Tableau 3	Comparaisons entre l'ACV et L'AMC	29
Tableau 4	Codification des réponses à la question "quelle catégorie est importante que l'autre ?"	34
Tableau 5	. Exemple de matrice d'évaluation comparative.....	34
Tableau 6	Indices aléatoires	35
Tableau 7	Emissions dans l'eau	39
Tableau 8	Emissions dans les sols industriels.....	39
Tableau 9	Emissions dans l'air (Source : base données du logiciel Gabi4)	39
Tableau 10	Emissions dans l'eau et facteurs de caractérisation	41
Tableau 11	Emissions dans les sols industriels et facteurs de caractérisation	41
Tableau 12	Emissions dans l'air et facteurs de caractérisation.....	42
Tableau 13	Impacts potentiels (Pli), Facteurs de normalisation (Ni) et Impacts potentiels normalisés (Pli/Ni).....	42
Tableau 14	Matrice AHP à l'échelle globale	44
Tableau 15	Matrice AHP à l'échelle régionale	45
Tableau 16	Matrice AHP à l'échelle locale	45
Tableau 17	Recommandations à l'endroit du gouvernement	48
Tableau 18	Recommandations à l'endroit des entreprises minières	50
Tableau 19	Ressources minières et permis attribués.....	69
Tableau 20	Emissions liées à la production du coke.....	74
Tableau 21	Emissions liées à la production de l'aggloméré	74
Tableau 22	Emissions liées à la production du haut-fourneau	74
Tableau 23	Emissions liées au système global	75

8 Glossaire

Stériles : Produits constitués par les roches et sols excavés lors de l'exploitation d'une mine après récupération du minerai, le minerai étant la partie commercialement valorisable.

Halde : Terme de métallurgie. Masse de matières qui provient de la gangue ou des minerais rebutés.

Selon l'article 2 du code minier Camerounais (Loi n° 001-2001 du 16 Avril 2001) :

- un minerai est toute substance matérielle sous forme solide, liquide ou gazeuse qui survient de manière naturelle sur ou sous la terre, mais ne comprenant ni l'eau, ni le pétrole ;
- une usine d'exploitation est définie comme tous bâtiments, installations, usines, appareils, équipements, outils ou autres biens de toute nature, fixés ou non sur la terre ;
- une exploitation est caractérisée par l'extraction de substances minérales solides, liquides ou gazeuses par n'importe quel procédé ou méthode, à la surface de la terre ou sous la surface de la terre, afin d'en extraire les substances utiles. Elle comprend toutes opérations directement ou indirectement nécessaires qui s'y rapportent.

Les qualités d'un bon indicateur sont les suivantes :

- la pertinence qui confère à l'indicateur la description parfaite du phénomène étudié et la ; capacité de garder la signification de sa mesure dans le temps ;
- la simplicité : l'information que présente l'indicateur doit être facile à obtenir et appréhender directement par l'utilisateur ;
- l'objectivité : le calcul de l'indicateur doit se faire sans ambiguïté, avec des grandeurs observables ;
- la sensibilité : l'indicateur doit être sensible aux variations du phénomène observé ;
- la précision : l'indicateur doit être défini avec une marge d'erreur acceptable ;
- la fidélité : l'indicateur doit être constant sur les unités spatio-temporelles de référence ;
- l'auditabilité : l'indicateur peut être vérifiable par une tierce ;
- la communicabilité : l'indicateur doit faciliter la communication entre les entreprises et les autres parties prenantes ;
- l'acceptabilité qui traduit le fait que l'indicateur ne devra pas heurter la sensibilité de l'utilisateur.

9 Annexes

9.1 Cadre juridique et institutionnel de l'exploitation minière au Cameroun

9.1.1 *Au niveau national*

Le Cameroun s'est doté d'un ensemble de textes en vigueur qui régissent la gestion de l'environnement en général et l'exploitation des ressources minières en particulier. Parmi ces textes nous pouvons citer :

- la loi N° 89/027 du 27 Décembre 1989 portant sur les déchets toxiques au Cameroun qui interdit l'introduction, le transit, la production et le stockage des déchets toxiques et dangereux sur le territoire camerounais. Cette loi précise également que les industries qui, par leurs activités produisent des déchets dangereux sont tenues d'en assurer l'élimination sans danger pour les hommes et pour l'environnement ;
- la loi N° 96/12 du 05 Août 1996 portant loi cadre relative à la gestion de l'environnement fixe le cadre juridique général de protection de l'environnement au Cameroun. En son article 9, elle précise que la gestion de l'environnement et des ressources naturelles s'inspirent dans le cadre des lois et règlements en vigueur, du principe de précaution, de pollueur-payeur, du principe d'action préventive, du principe de participation et du principe de responsabilité. Les articles de 21 à 60 portent sur la protection des milieux récepteurs qui doivent être préservés de toute forme de dégradation et de contamination par des produits et déchets de toute nature. Ainsi toute entreprise qui produit des déchets doit assurer son élimination sans porter atteinte à l'environnement et informer le public sur les effets de ses activités sur l'environnement et sur la santé humaine ;
- la loi N°98/005 du 14 Avril 1998 portant régime de l'eau en son article 4 interdit les actes qui pourraient altérer la qualité des eaux de surface, de mer ou souterraines et porter atteinte non seulement à la santé publique mais aussi à la faune et la flore aquatique ou sous-marine. L'article 6 par contre stipule que toute personne physique ou morale propriétaire d'installations susceptibles d'entraîner la pollution des eaux doit prendre des mesures pour éliminer ou limiter ses effets ;
- la loi N°98/015 du 14 juillet 1998 relative aux établissements classés dangereux, insalubres ou incommodes qui stipule que les établissements classés sont tenus d'établir un plan d'urgence devant être validé par l'administration compétente et ceux générateurs de pollutions doivent procéder à l'auto-surveillance de leurs rejets. Dans le même ordre d'idées, les articles 25 et 26 stipulent que les établissements classés qui polluent l'environnement sont assujettis au paiement de la taxe annuelle à la pollution et ceux qui entreprennent des actions de promotion de l'environnement bénéficient d'une déduction sur le bénéfice imposable suivant les modalités fixées par la loi des finances ;
- la loi N°001-2001 du 16 Avril 2001 portant sur le Code Minier du Cameroun stipule en son article 85 que toute activité minière doit obéir à la législation et à la réglementation en matière

de protection et de gestion de l'environnement en vigueur au Cameroun. Par ailleurs, l'article 87 de la dite loi précise que pour assurer une exploitation rationnelle des ressources minières en harmonie avec l'environnement, les titulaires de titres miniers doivent veiller à la prévention et la minimisation de tout déversement dans la nature, à la protection de la faune et de la flore, à la promotion et au maintien de la bonne santé des populations, à la diminution des déchets dans la mesure du possible, à la bonne disposition des déchets non recyclés d'une façon adéquate pour l'environnement et après information et agrément des administrations chargées des mines et de l'environnement. L'article 101 enfin donne des orientations en ce qui concerne la surveillance des activités minières par les autorités administratives compétentes.

Toutes ces lois s'accompagnent des dispositions pénales qui sanctionnent tout contrevenant.

9.1.2 *Au niveau international*

Le Cameroun prend part à plusieurs accords multilatéraux en matière de gestion de l'environnement.

On peut citer :

- l'adhésion à la Convention RAMSAR en 2005 pour la protection des zones humides ;
- la convention cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques signé en 1992 et ratifiée le 19/10/1994 ainsi que le Protocole de Kyoto auquel il adhère depuis 2002 ;
- la convention Cadre des Nations Unies de Lutte contre la Désertification signée en 1994 et ratifiée le 29/5/1997 ;
- la convention des Nations Unies sur la Diversité Biologique signée en 1992 et ratifiée le 29/8/1994 ;
- la convention internationale sur la responsabilité civile en matière des dommages causés par la pollution (Bruxelles) et celle de 1971 pour la création d'un fond international de compensation ratifiée le 17/05/1984 ;
- le protocole de Montréal ratifié le 30 août 1989.

9.1.3 *Le cadre institutionnel*

La gestion de l'environnement au Cameroun s'inscrit dans le cadre d'un plan national de gestion de l'environnement (PNGE) qui traduit la politique du gouvernement Camerounais en la matière.

L'institution en charge de l'environnement est le Ministère de l'environnement et de la protection de la nature qui 'élabore, met en œuvre et évalue la politique du gouvernement en matière de gestion de l'environnement. Ce ministère dispose d'une direction de la norme et du contrôle chargée de l'élaboration, du suivi et du respect des normes, directives et standards environnementaux, de l'élaboration et du suivi de l'application des textes réglementaires et normes en matière d'environnement, des inspections et contrôles environnementaux entre autres.

Le Ministère de l'Industrie, des Mines et du Développement Technologique par contre, est chargé de l'élaboration des stratégies de développement des industries minières ainsi que du développement technologique dans ce secteur. A ce titre et dans le cadre de ses attributions, il élabore et met en œuvre le plan d'industrialisation du pays en général et du secteur minier en particulier, organise la prospection géologique et les activités minières, veille à l'engagement des entreprises minières en matière d'environnement dans le cadre du code minier qui régit ce secteur.

Les services déconcentrés des Ministères ci-dessus désignés sont chargés de la mise en œuvre de leur politique générale et de leurs attributions, ce dans le cadre de leur domaines de compétences respectifs. Ces services comportent des délégations provinciales et départementales

9.2 Le Cameroun, ses ressources minières et les permis attribués

9.2.1 *Présentation du Cameroun*

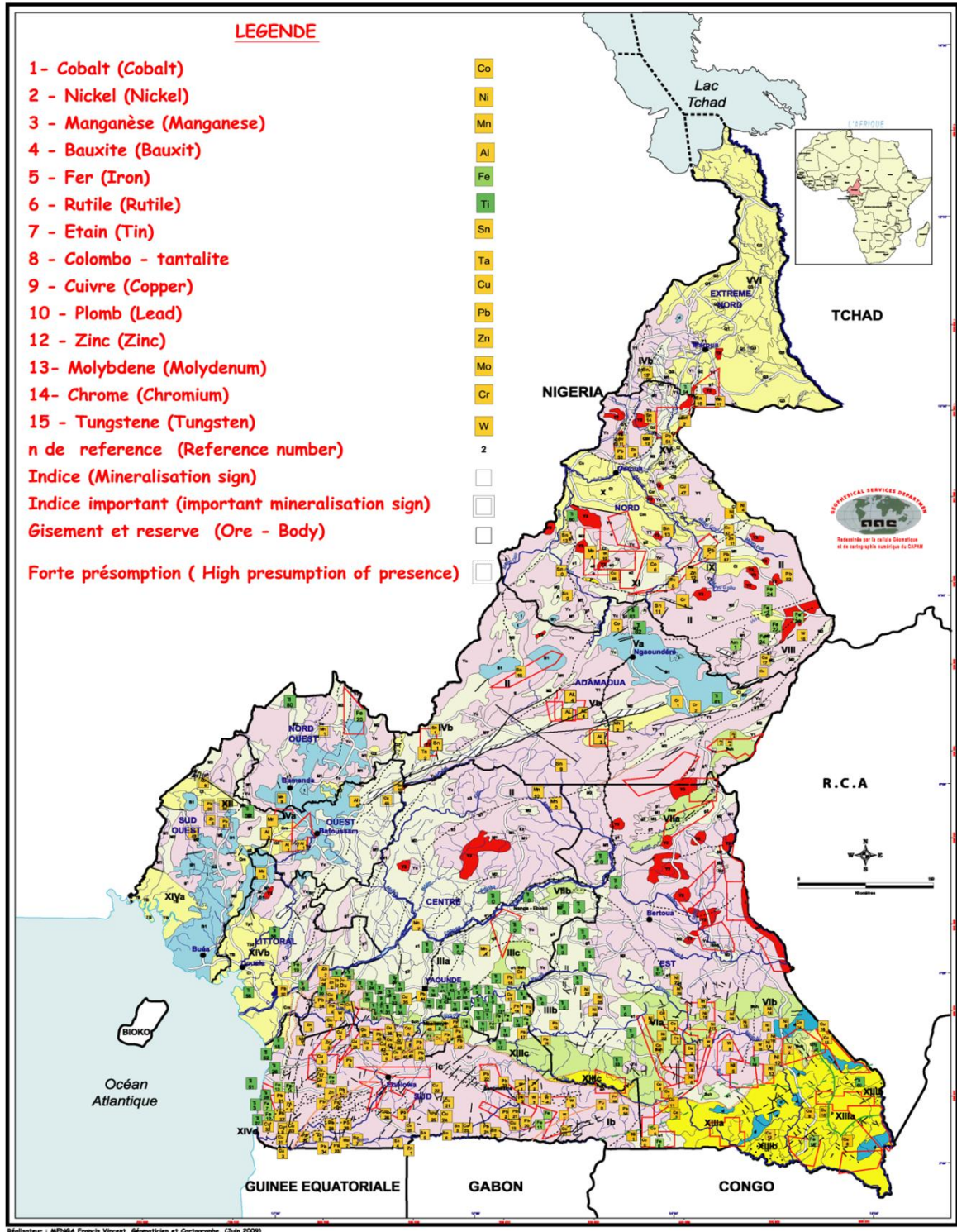
Le Cameroun (figures ci-dessous) est un pays de l'Afrique Centrale situé au fond du Golfe de Guinée, un peu au dessus de l'équateur. Il s'étend entre 1°40 et 13° latitude Nord, puis entre 8°80 et 16°10 longitude est. Il est limité au Nord par le Tchad, au Sud par le Gabon, la Guinée Equatoriale et le Congo-Brazzaville, à l'Ouest par le Nigeria et à l'Est par la République Centrafricaine. Il faut également noter que le Cameroun dispose d'une frontière maritime au Sud-ouest qui lui donne une grande ouverture sur l'océan atlantique

9.2.2 *Le potentiel minier Camerounais et les activités minières*

9.2.2.1 *Le potentiel minier*

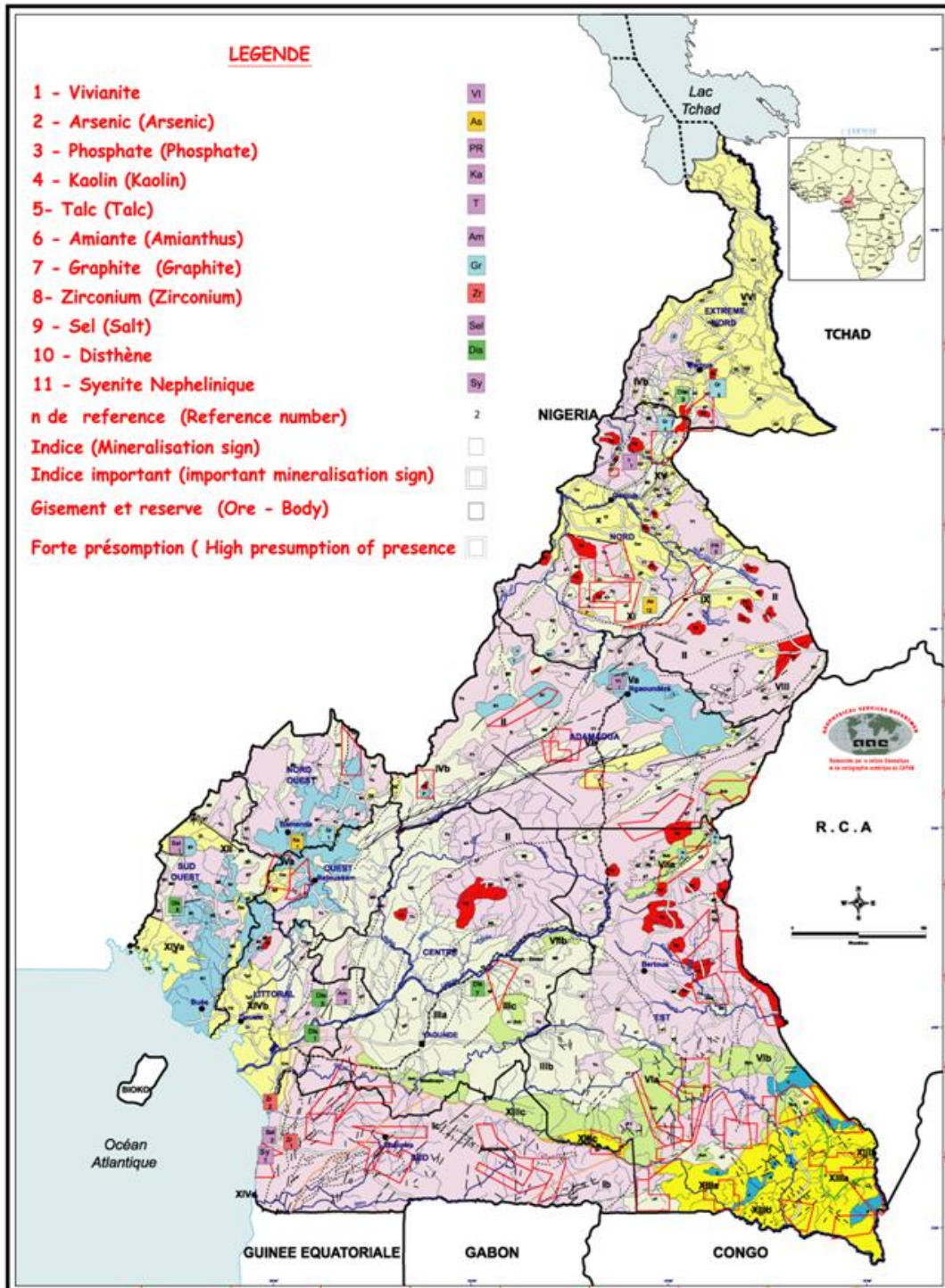
Selon le Ministère des Mines et du Développement Industriel et Technologique (MINIMIDT), le Cameroun dispose d'importantes réserves de Bauxite, de Fer, de Diamant, de Nickel - Cobalt, de Cassitérite associée au Coltan, de la Syénite Néphélinique et de l'Uranium. La Bauxite représenterait la cinquième ou la sixième réserve du monde. Le Cobalt en association au Nickel constitue également une importante réserve et un gisement stratégique, au regard de son utilisation dans la fabrication des batteries qui pourraient constituer une alternative aux énergies fossiles très polluantes.

RESSOURCES MINÉRALES DU CAMEROUN: MÉTALUX DE BASE



Source : MINIMIDIT, 2009

RESSOURCES MINERALES DU CAMEROUN: MINERAUX INDUSTRIELS

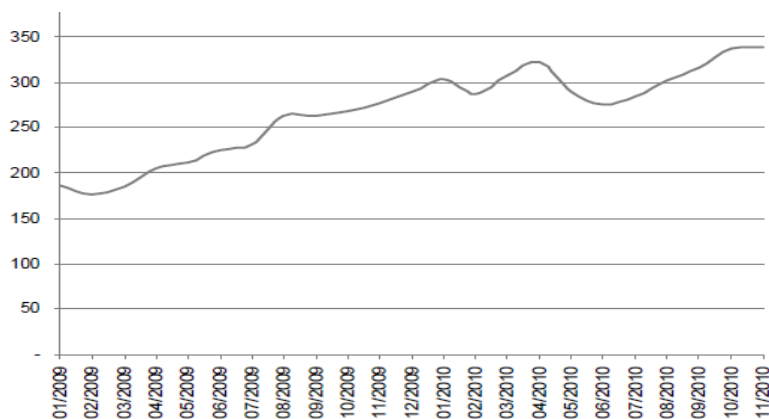


D'importantes réserves de Fer (2000 Milliards de tonnes avec possibilité de production de 30 millions de tonnes/an) feront également l'objet d'une exploitation industrielle d'ici mi - 2011. Jusqu'ici le Cameroun n'a pas été considéré comme pays producteur de Diamant, mais avec une récente estimation de ses réserves à 740 millions de Carats, qui représentent environ cinq fois la production mondiale, le Cameroun pourrait se hisser si les estimations sont exactes au premier rang des pays producteurs de Diamant dans le monde. Le Coltan fait également partie des ressources minières exploitables au Cameroun. D'importantes études en cours permettront d'estimer dans un avenir proche les réserves de ce minerai important pour l'industrie de la téléphonie mobile. Le Cameroun pourrait également abriter l'une des premières réserves mondiales de Syénite Néphélinique qui est un matériau utilisé dans la fabrication des sarcophages importants dans la gestion des déchets radioactifs. En ce qui concerne le Rutile, le Cameroun abrite la deuxième réserve mondiale de ce minerai. L'Uranium, l'Or et le Saphir qui sont des minerais dont l'importance économique n'est plus à démontrer, constituent également d'importantes réserves.

9.2.2.3 Les activités minières

Ces activités ont débuté depuis les années 1933 avec l'attribution des premiers titres miniers permettant l'exploitation des gisements d'or de Bétaré - Oya et de Rutile à Otélé, puis d'Étain à Mayo - Darlé (MINIMIDT, 2010). Il est également important de noter que ces activités ont jusqu'ici été beaucoup plus axées sur l'exploitation artisanale, en dehors de l'exploitation pétrolière qui ne fait pas partie de cette étude, dans le seul souci d'alimenter les économies des métropoles coloniales. Donc il n'y a pas eu de véritable exploitation minière à l'échelle industrielle au Cameroun depuis les indépendances. Aujourd'hui la flambée croissante au niveau des cours mondiaux des matières premières (figure 10) qui serait liée à la montée en puissance de nouvelles économies émergentes en particulier la Chine et l'Inde, ne peut que nourrir le grand espoir des pays qui, comme le Cameroun regorgent d'importantes ressources minières.

Figure 10 Indice des prix des minéraux, des minerais et des métaux, moyennes mensuelles, janvier 2009-novembre 2010 (En dollars courants, base 2000 = 100)



Source : CNUCED, 2011

Pour rendre le secteur minier camerounais attractif en matière d'investissements privés, le Cameroun s'est doté d'un code minier assez compétitif ainsi que des textes y afférents. Il en résulte aujourd'hui que le Cameroun a attribué 87 permis d'exploration (Tableau 19).

Fort de son potentiel, le Cameroun pourra certainement compter sur les ressources minières pour s'inscrire au rang des pays dits à revenus intermédiaires comme le précise le document camerounais de stratégie de croissance et de l'emploi (DSCE, 2009).

Tableau 19 Ressources minières et permis attribués

Substances minérales	Fer	Nickel-Cobalt	Bauxite	Uranium	Étain et wolfram	Or	Diamant	Tungstène	Rutile et disthène	Saphir
Nombre de permis de recherche	08	08	05	16	01	25	07	01	02	02
Nombre de permis d'exploitation		01								

Substances minérales	Cuivre	Syénite	Calcaire	Marbre	Marbre et pierres ornementales	Pierres ornementales	Tous minéraux
Nombre de permis de recherche	01	01	03	04	03	03	03
Nombre de permis d'exploitation			01	02			

Source : MINIMIDT, 2010

9.3 Apport du stage dans l'appropriation de la méthodologie

Le stage de mise en situation professionnelle effectué à l'Institut Jean Lamour (Ecole des Mines de Nancy en France), a porté sur l'inventaire du cycle de vie de la filière fonte et son implémentation sous Gabi4, de l'entreprise Saint-Gobain, une entreprise du secteur de la métallurgie de la Région Lorraine. Cet inventaire s'inscrit dans la recherche par cette entreprise des solutions de réductions de ses émissions de CO₂ en vue de se conformer à la réglementation sur les émissions de GES (gaz à effet de serre) qui entre en vigueur en Europe et en France en 2013. L'approche utilisée a été la suivante :

- Revue bibliographique et définition du système de production de la fonte par cette entreprise
- Conception d'un arbre à processus de la filière en question
- Implémentation de l'arbre à processus sous le logiciel d'ACV Gabi4
- Calculs des bilans Intrants/extrants du système à partir de Gabi4
- Tracé des diagrammes et interprétation des résultats obtenus

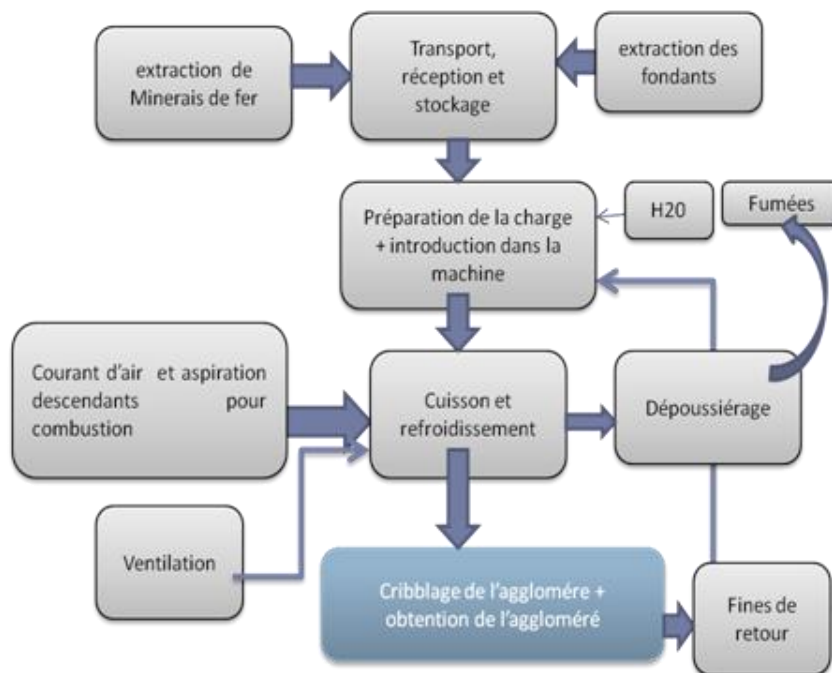
9.3.1 *Revue de la bibliographie et définition du système*

La revue bibliographique a essentiellement porté sur des documents et articles qui traitent de l'analyse de cycle de vie ainsi que de sa démarche méthodologique. Ceci a débouché sur la définition du système de production de fonte dans l'approche intégrée classique qui englobe la production du coke métallurgique, la production de l'aggloméré qui est une forme d'agrégats de fines de minerais de fer et la production de la fonte au niveau du haut fourneau. L'unité fonctionnelle retenue est la tonne de fonte.

9.3.2 *La conception des arbres à processus*

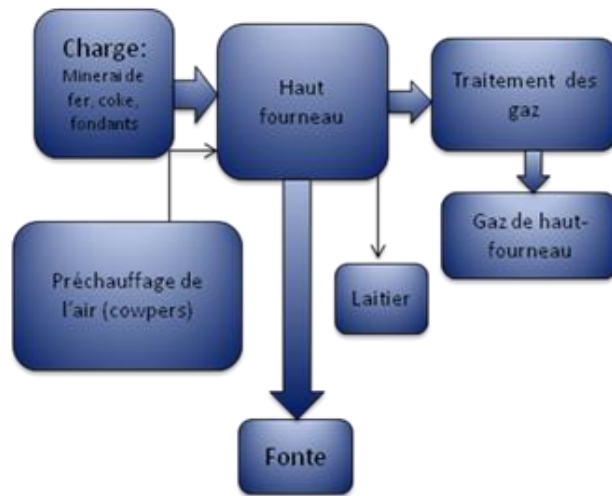
A partir de la démarche précédente, les arbres à processus respectifs de la cokerie, de l'agglomération et du haut-fourneau ont été conçus en s'appuyant sur les réalités de l'entreprise Saint-Gobain Pam (Figures 11, 12, 13). A partir de ces arbres à processus, un arbre à processus global a été conçu pour le système de production de la fonte.

Figure 11 Arbre à processus du système de la production de l'aggloméré



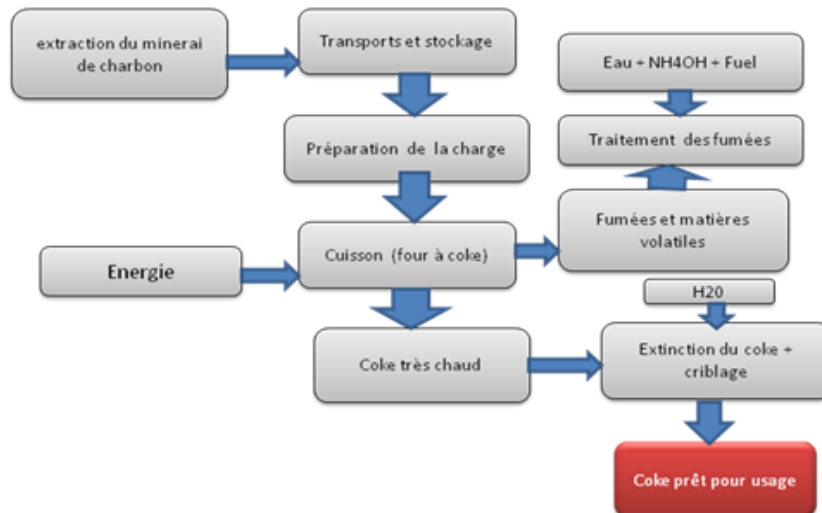
Source : Auteur

Figure 12 Arbre à processus du système de production de la fonte



Source : Auteur

Figure 13 Arbre à processus du système de production du coke

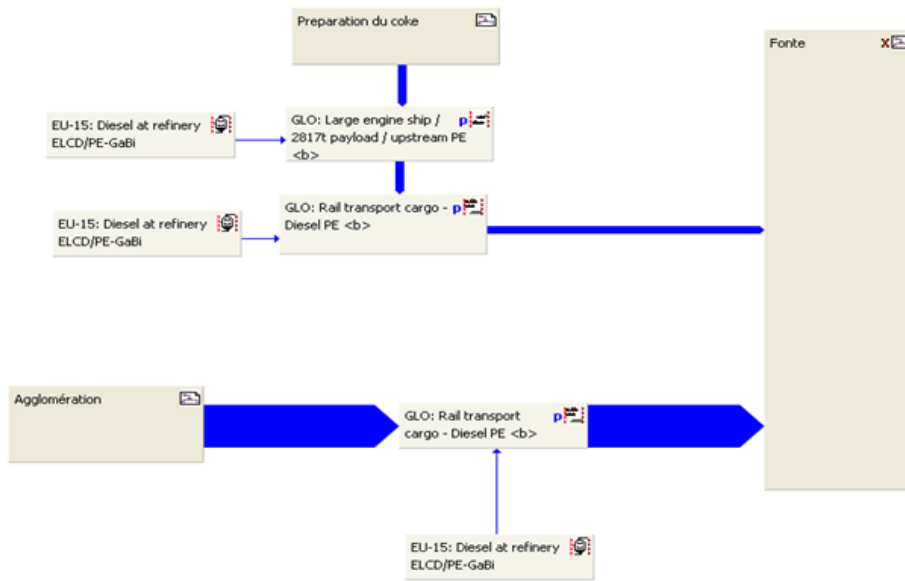


Source : Auteur

9.3.3 Implémentation du système sous Gabi 4

Le logiciel Gabi4 offre une grande gamme de fonctionnalités qui permettent la modélisation simplifiée des systèmes assez complexes. Il comporte une documentation détaillée sur le contenu des bases de données, des graphiques clairs et faciles à utiliser.

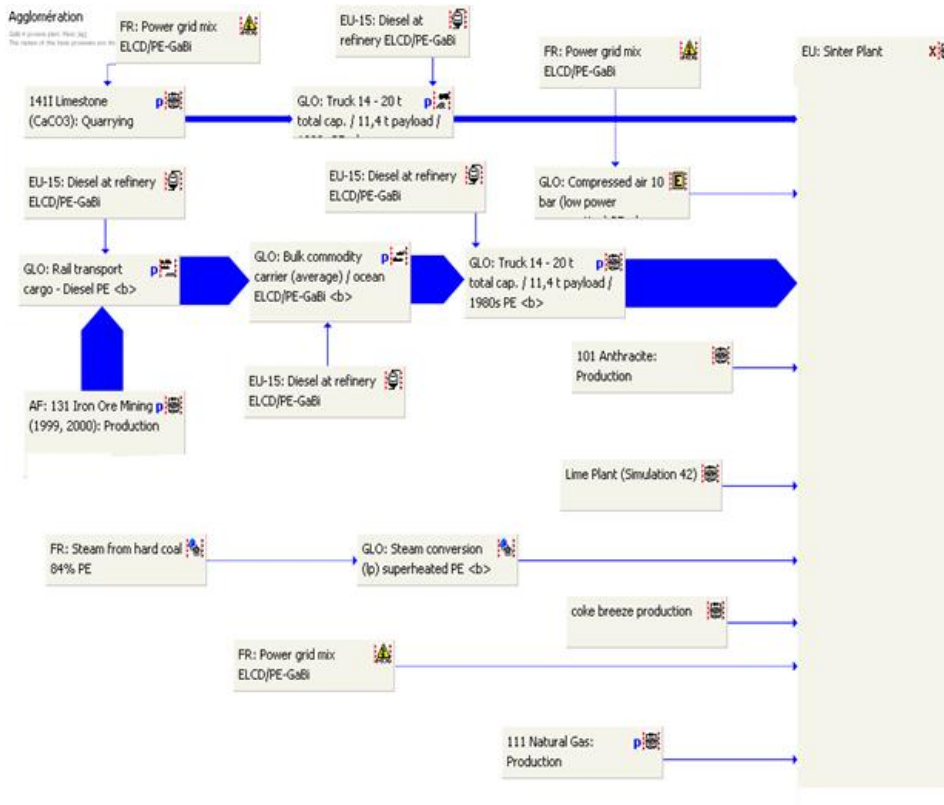
Figure 14 Implémentation du système de production de la fonte sous Gabi 4



Source : Auteur

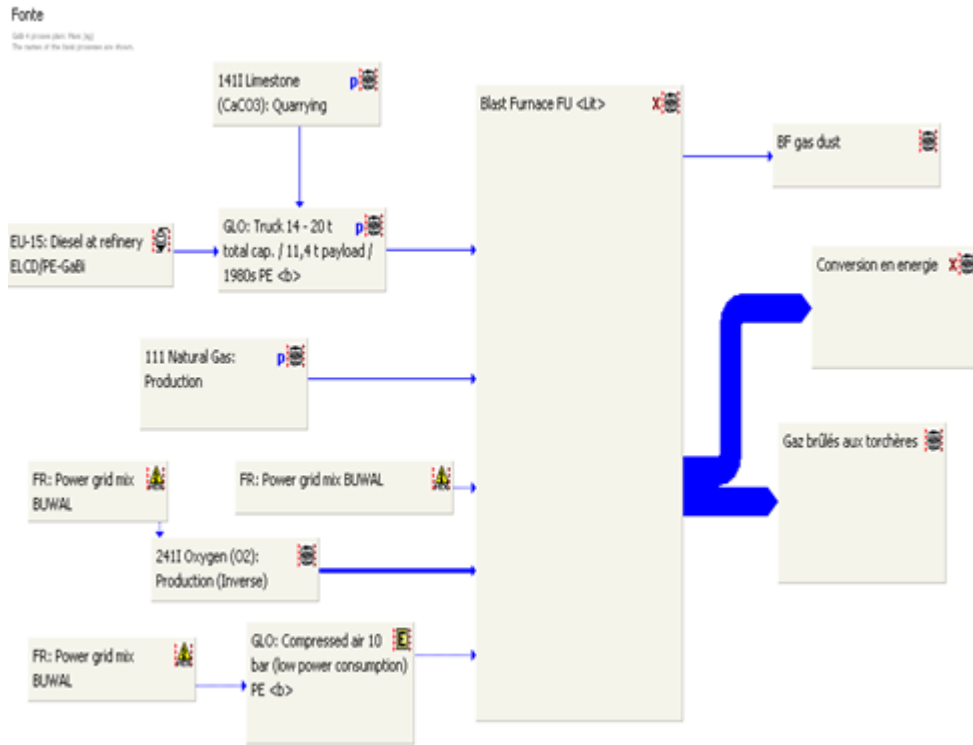
Ainsi des plans ont été établis pour la production de l'aggloméré, la production de la fonte, la production du coke (figures 15, 16, 17) et le système global (figure 14) qui englobe les trois entités précédentes.

Figure 15 Implémentation du système de production de l'aggloméré sous Gabi 4



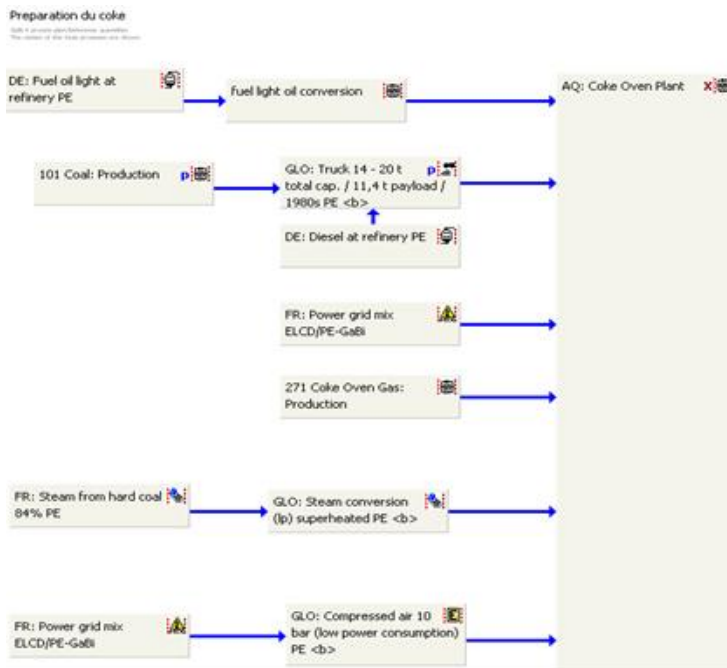
Source : Auteur

Figure 16 Implémentation du système de production de fonte



Source : Auteur

Figure 17 Implémentation du système de production du coke sous Gabi 4



Source : Auteur

9.3.4 Le calcul des bilans Intrants/Extrants du système

Les résultats de ces calculs ont été obtenus pour la production du coke, de l'aggloméré, de la fonte et du système global à partir du logiciel Gabi 4. Ces bilans constituent pour chaque entité du système global ainsi que pour le système global, les émissions de principaux gaz à effet de serre engendrées respectivement par la production du coke, la production de l'aggloméré, le haut-fourneau et le système global. Quelques éléments de ces bilans sont présentés dans les tableaux 20, 21, 22, 23 et 24 respectivement.

Tableau 20 Emissions liées à la production du coke

Substances	Quantités	Unité
CO ₂	398,28	Kg/t de coke
Méthane	0,13541	Kg/t de coke
Vapeur d'eau		
Protoxyde d'azote (Nitrous oxide)	0,1238	Kg/t de coke
Ozone		
Gaz d'échappement (exhaust)	127,87	Kg/t de coke

Source : Auteur

Tableau 21 Emissions liées à la production de l'aggloméré

Substances	Quantités	Unité
CO ₂	334,96	Kg/t d'aggloméré
Méthane	0,11784	Kg/t d'aggloméré
Vapeur d'eau		
Protoxyde d'azote (Nitrous oxide)	0,00515	Kg/t d'aggloméré
Ozone		
Gaz d'échappement (exhaust)	27,066	Kg/t d'aggloméré

Source : Auteur

Tableau 22 Emissions liées à la production du haut-fourneau

Substances	Quantités	Unité
CO ₂	1513.17	Kg/t de fonte
Méthane	0.14196	Kg/t de fonte
Protoxyde d'azote (Nitrous oxide)	0.00067907	Kg/t de fonte
Ozone		Kg/t de fonte
Gaz d'échappement (exhaust)	0.04	Kg/t de fonte

Source : auteur

Tableau 23 Emissions liées au système global

Substances	Quantités	Unité
CO ₂	2191.3	Kg/t de fonte
Méthane	0.38805	Kg/t de fonte
Protoxyde d'azote (Nitrous oxide)	0.48656	Kg/t de fonte
Ozone		Kg/t de fonte
Gaz d'échappement (exhaust)	85.118	Kg/t de fonte

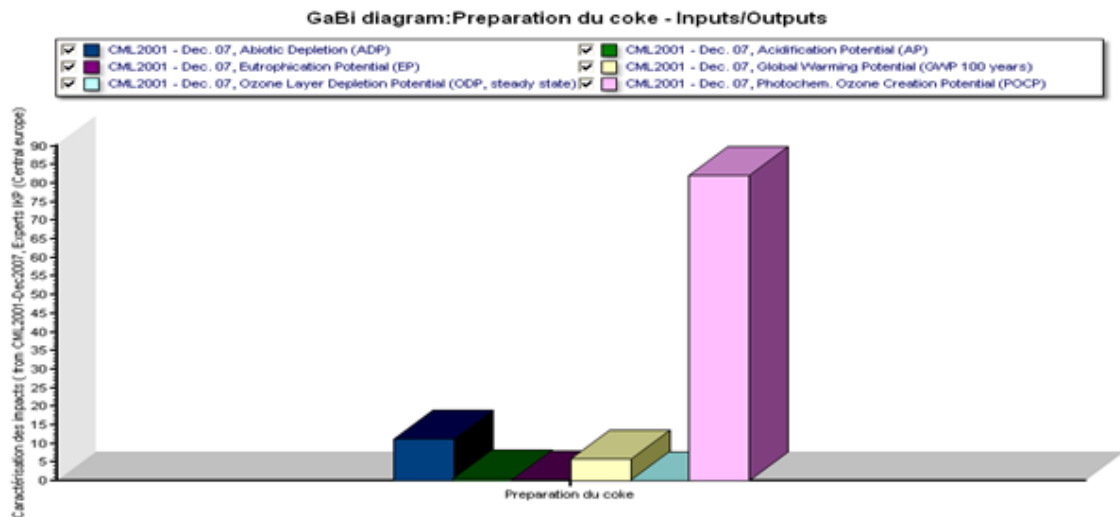
Source : Auteur

9.3.5 Tracé des diagrammes et interprétation des résultats

Les diagrammes de chacune des entités précédentes du système ainsi que celui du système global ont été tracé à partir de Gabi4. Ils ont permis de déterminer les principaux impacts environnementaux des différentes entités et du système global par les méthodes de normalisation et d'évaluation CML 2001-Déc 2007, EU 25+3 et de CML2001-Déc2007, Expert IKP respectivement.

Le système de production du coke engendre au regard de la figure 19, de fortes émissions à l'origine de la production de l'ozone stratosphérique.

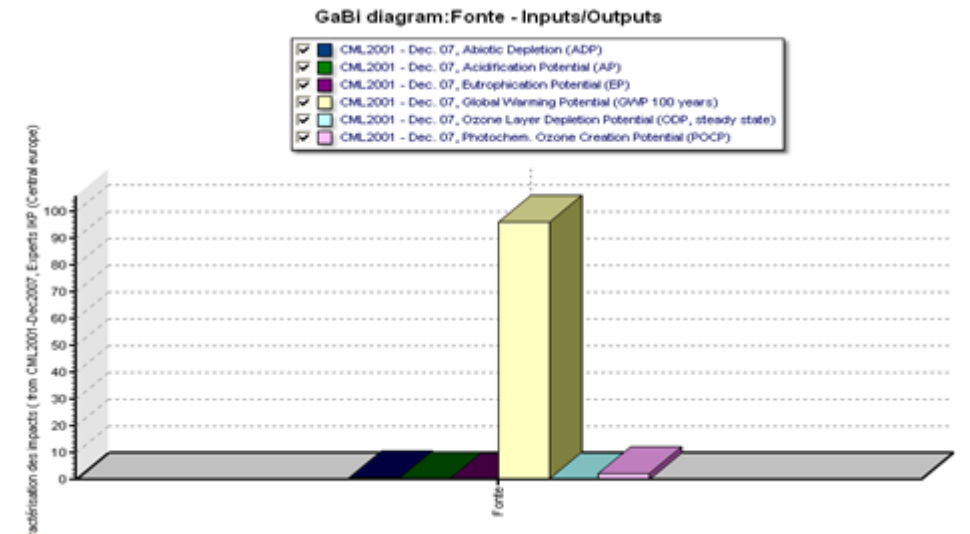
Figure 18 Impacts environnementaux de la préparation du coke



Source : Auteur

La production de la fonte au niveau du haut-fourneau engendre d'importantes émissions de gaz à effet de serre (figure 19).

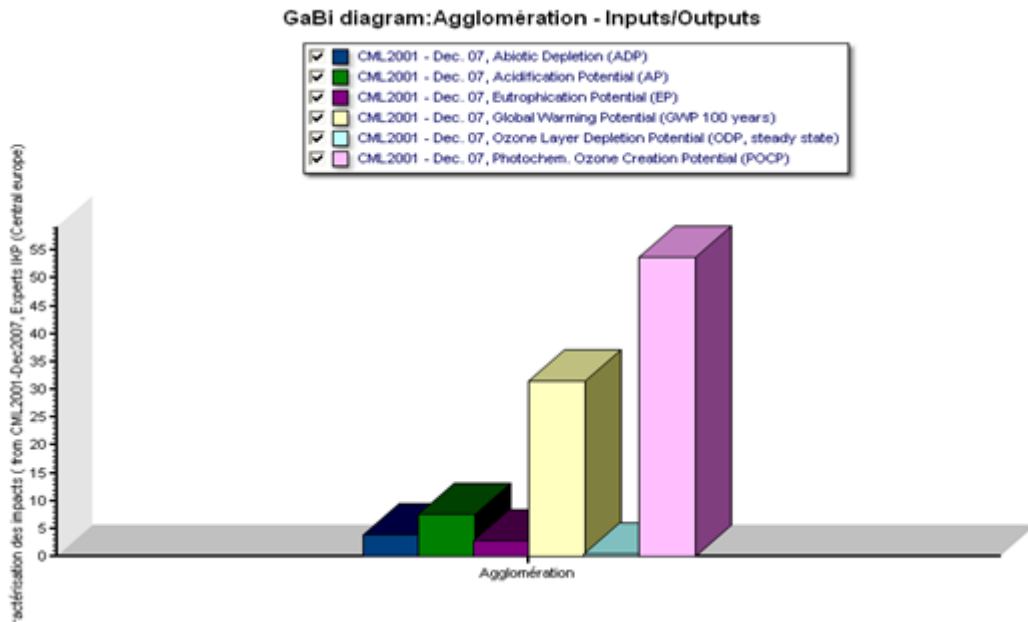
Figure 19 Impacts de la production de fonte au niveau du haut-fourneau



Source : Auteur

La production de l'aggloméré par contre engendre un fort potentiel de production de l'ozone stratosphérique (figure 20)

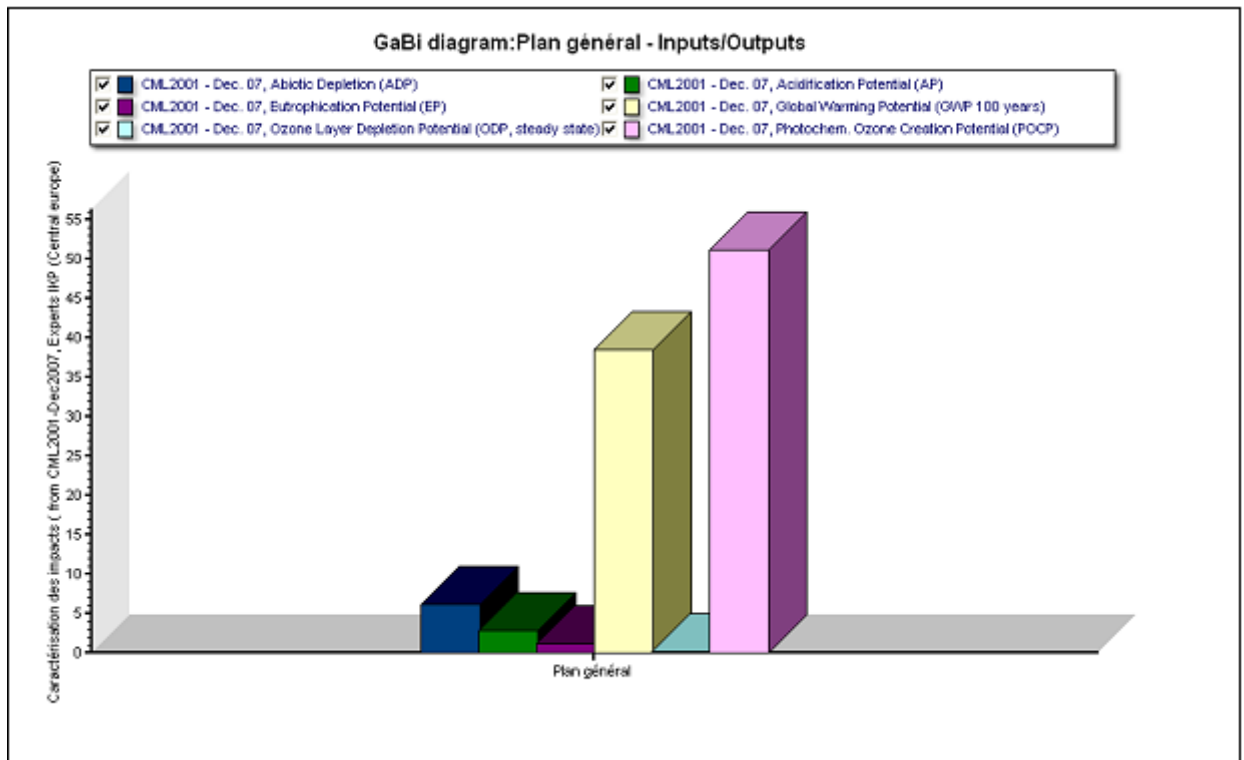
Figure 20 Impacts environnementaux de la production de l'aggloméré



Source : Auteur

Le système global enfin engendre des impacts importants sur la formation de la couche d'ozone stratosphérique et sur le réchauffement climatique global (figure 21).

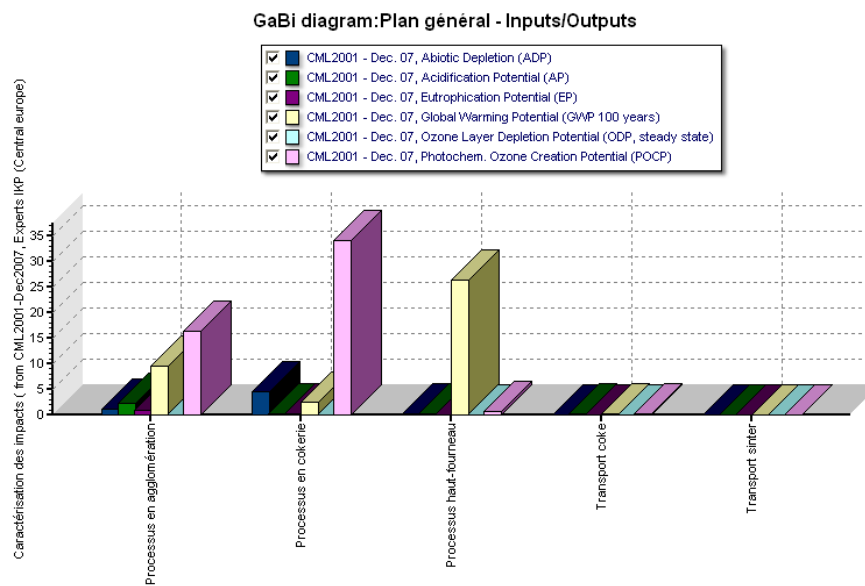
Figure 21 Impacts environnementaux du système global



Source : Auteur

Les processus unitaires à l'origine des principaux impacts observés ont été définis grâce à Gabi 4.

Figure 22 Impacts globaux de la filière fonte



Source : Auteur

Pour le système global par exemple, il a été établi que la production du coke engendre le plus grand impact sur la formation de la couche d'ozone impropre, la production de la fonte au niveau du haut fourneau engendre d'énormes quantités de GES alors que la production de l'aggloméré engendre un grand impact également sur la formation de la fausse couche d'ozone (figure 22).

En somme, la méthodologie sur laquelle se fonde le mémoire, s'est profondément appuyée sur les acquis de la méthodologie de l'analyse de cycle de la filière fonte de l'entreprise Saint-Gobain PAM et de son implémentation sous Gabi 4.