



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou
Faculté des Sciences Biologiques et Sciences Agronomiques
Département des Sciences Géologiques

Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de

Master

En

GEOLOGIE

OPTION : RESSOURCES MINERALES ET ENVIRONNEMENT

THEME

**L'EVALUATION D'IMPACT DE L'INDUSTRIE DU CIMENT SUR L'ENVIRONNEMENT
A L'AIDE DE L'ANALYSE DE CYCLE DE VIE (ACV) : CAS DE LA CIMENTERIE DE
HDJAR-SOUD(SCHS) A SKIKDA**

Présenté par : MEZIANI Sabrina

YOUSFI Nadia

Soutenu le : 21.09.2017

Devant le jury :

Présidente :	Mme : D. IZRI	Maître Assistante A	UMMTO
Rapporteur :	Mr : A. MAKHLOUF	Maître Assistant B	UMMTO
Examineur :	Mr : M. ISSAAD	Maître Assistant A	UMMTO

2016/2017

Remerciement

Nos remerciements s'adressent en premier lieu à ALLAH le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous a donné durant toutes ces longues années.

Nous souhaitons tout d'abord remercier notre encadreur Dr : A. MAKHLOUF, pour sa grande disponibilité, ses conseils avisés et son aide tout au long du projet.

Nos remerciements s'adressent également à tous les professeurs membres de jury qui nous ont honorés et qui ont accepté de jugé ce modeste travail.

Nos remerciements vont également à tous les enseignants du département de science de la terre et du l'univers.

Enfin, nos sincères remerciements vont à toute personne ayant contribué de près ou de loin dans la réalisation de ce travail.

Je dédie ce modeste travail :

A mes chers parents

Ghania ET M'hana

*Et mon mari Tarek qui m'a soutenu tout au long
de travail.*

A mes frères et sœurs

A tous mes amis et amies

Et mon collègue Sabrina

A tous ceux que j'aime

Nadia

Je dédie ce mémoire :

à ma mère Houria

et mon père Mabrane

*pour leur patience, leur amour, leur soutien et leur
encouragement.*

A mes sœurs Liza, Katia et sa petite fille Céline,

ma grand-mère Fatima.

A mes frères Mohand, Yanis.

A mes adorables amis (es).

Et

mon collègue Nadia.

Sabrina

Liste des Acronymes

Abréviation	Définition
ACV	Analyse de Cycle de Vie
ACVS	Analyse du Cycle de Vie Sociale
ADCA	Analyse de la Durabilité du Cycle de Vie
AEE	Analyse d'Eco-Efficacité
AES	Analyse Entrée-Sortie
AESE	Analyse des Entrées-Sorties de l'Environnement
CCV	Coût de Cycle de Vie
CFC	Chlorofluorocarbures
CHF	Ciment de Haut Fourneau
CETIM	Centre d'Etudes et de services Technologiques de l'Industrie des Matériaux de construction
CLC	Ciment au Laitier et au Cendre
CLK	Ciment de Laitier au Clinker
CML	Université des Sciences de l'Environnement de Leiden
COVNM	Composés Organiques Volatils Non Méthanes
CLX	Ciment au laitier a la chaux
CPJ	Ciment Portland Composé
CPZ	Ciment pozzollanique
CPA	Ciment Portland Artificiel
CRS	Ciment Résistant aux Sulfates
DEC	Demande d'Energie Cumulée
EDE	Études de Déchet
EDIP	Ecole Danoise Industriels des Produits
EIE	Etude d'Impact sur l'Environnement
EPFL	Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
ERCE	L'entreprise Régionale du Ciment de l'Est
GEF	Globale Environnement Facility
GES	Gaz à Effet de Serre
GEMIS	Global Emission Model for Integrated Systems
GICA	Groupe Industriel des Ciments d'Algérie
ICV	Inventaire de Cycle de Vie
ISO	International Standard Organisation
LCA	Life Cycle Assessment
MEM	Ministère d'Energie et des Mines
PCI	Pouvoir Calorifique Inferieur
PPOT	Potentiel Précurseur d'Ozone Troposphérique
RME	Ressources Minérales et Environnement
SCHS	La Société Cimentaire de Hdjar-Soud
UF	Unité Fonctionnelle

Liste des Tableaux

Titre et numéro	Page
Tableau 1 : Propriétés physiques et chimiques de la silice.....	10
Tableau 2 : Minerais de fer et leurs teneurs en fer.....	11
Tableau 3 : Désignation des différents types de ciment.....	18
Tableau 4 : Spécification et valeurs granite en fonction de classe	19
Tableau 5 : Composition du cru de Hdjar-Soud.....	44
Tableau 6 : Bilan d'entrée pour la production d'un sac du ciment (50 kg).....	48
Tableau 7 : Bilan total de carbone et contribution des principaux GES.....	52
Tableau 8 : Bilan d'émission pour l'acidification.....	53
Tableau 9 : Bilan d'émission pour la formation d'ozone troposphérique (PPOT).....	54

Liste des Figures

Titre et numéro	Page
Figure 01 : Schéma d'appareillage de la fabrication du ciment.....	14
Figure 02 : Situation géographique de la société cimentaire de Hdjar-Soud	23
Figure 03 : Situation géographique de la carrière de Hdjar-Soud	24
Figure 04 : Chiffres d'affaires annuelles de ciment en Tonne.....	25
Figure 05 : Production annuelle de ciment en Tonne.....	25
Figure 06 : Schéma représentant de cycle de vie d'un produit.....	27
Figure 07 : Principales phases de l'analyse de cycle de vie.....	30
Figure 08 : Les différents éléments de la phase d'évaluation des impacts environnementaux	32
Figure 09 : Les frontières de système étudié.....	41
Figure 10 : Transport de la matière première par convoyeur à bonde.....	43
Figure 11 : Principales zones de réactions dans le four et leurs produits.....	47
Figure 12 : Broyeur à boulets pour le ciment.....	48
Figure 13 : Présentation graphique de l'arbre de procédés de production de ciment portland.....	50
Figure 14 : Principaux facteurs d'émission dans le réchauffement climatique.....	52
Figure 15 : Principaux facteurs d'émission dans la catégorie d'impact d'acidification.....	53
Figure 16 : Principaux facteurs d'émission dans la catégorie d'impact de PPOT.....	54
Figure 17 : Contribution des principales substances dans les différentes phases de vie de ciment portland.....	55
Figure 18 : Contribution des principaux carburants utilisés pour la production d'une UF de ciment portland.....	55

Sommaire

- Remerciement.....	i
- Dédicace.....	ii
- Liste des acronymes.....	iv
- Liste des tableaux.....	v
- Liste des figures.....	vi
- Sommaire.....	vii
- Résumé.....	x
- Introduction générale.....	1

Chapitre I : Généralité du Ciment

1. Rappel historique.....	3
2. Définition.....	3
3. Ciment Portland.....	4
4. Matières premières pour la fabrication de portland.....	4
4.1. Caractéristiques générales des principaux gisements.....	4
4.1.1. Gisement de calcaire.....	4
a. Formation du gisement.....	5
b. Caractéristiques physiques.....	5
c. Caractéristiques chimiques.....	5
d. Compositions minéralogiques et couleur.....	6
4.1.2. Gisement d'argile.....	6
a. Genèse.....	6
b. Principales familles.....	7
4.1.3. Gisement de silice.....	7
a. Origine.....	7
b. Métamorphose.....	8
c. Propriétés physiques et chimiques de la silice.....	8
4.1.4. Minerais de fer.....	9
a. Occurrence et gisement.....	9
4.1.5. Gisement de bauxite.....	10
a. Genèse et minéralogie.....	10
5. Principaux procédés et méthodes de fabrication de ciment.....	11
5.1. Les différents procédés.....	11
5.1.1. En voie sèche.....	11
5.1.2. En voie semi-sèche.....	11
5.1.3. En voie semi-humide.....	11
5.1.4. En voie humide.....	11
5.2. Méthodes de fabrication.....	11
5.2.1. Extraction des matières premières.....	12
5.2.2. Stockage et broyage des matières premières.....	13
a. En voie sèche et semi-sèche.....	13
b. En voie humide ou semi-humide.....	13
5.2.3. Cuisson pour obtention du Clinker.....	13
5.2.4. Broyage du Clinker et d'additifs pour obtenir le ciment.....	14
6. Les différents types et classification des ciments.....	14
6.1. Gamme de produits en Algérie.....	14

Sommaire

6.1.1. Classification en fonction de leur composition minéralogique	15
6.1.2. Classification en fonction de leurs résistances normale	17
6.1.3. Autres types de ciments	17
6.1.4. Utilisation des différents ciments	18
6.1.5. Utilisation des ciments aux laitiers	19
7. Evaluation des impacts sur l'environnement	19
8. La société cimentaire de Hdjar-soud	20
8.1. Historique de la cimenterie de Hdjar-soud	20
8.2. Situation géographique de la cimenterie de Hdjar-soud	21
8.3. Situation géographique de la carrière	22
8.4. Capacité de production	22
8.5. Données de production et chiffres d'affaires	23

Chapitre II : Analyse de Cycle de Vie (ACV)

1. Rappel historique	24
2. Définition et objectif de l'ACV	24
2.1. Définition	24
2.2. Les objectifs de l'ACV	25
3. Les principales applications de l'ACV	26
4. Les avantages de l'ACV	26
5. Méthodologie de l'ACV	27
6. La réalisation de l'ACV	27
6.1. Définition des objectifs et du champ de l'étude	28
6.1.1. Objectif de l'étude	28
6.1.2. Le champ d'étude	28
6.1.3. La fonction	29
6.1.4. L'unité fonctionnelle	29
6.2. Inventaire de cycle de vie	30
6.2.1. Qualité des données	30
6.3. Evaluation des impacts environnementaux	30
6.4. Interprétation des résultats	30
7. Les catégories d'impacts	31
7.1. Epuisement des ressources	31
7.2. Energie primaire non renouvelable	31
7.3. Réchauffement climatique	31
7.4. Acidification terrestre	32
7.5. Oxydation photochimique	32
7.6. Détérioration de la couche d'ozone	33
7.7. Formation des micros particules (matière particulaire)	33
7.8. Radiation ionisante	33
7.9. Eutrophisation aquatique	33
8. Les méthodes d'évaluation d'impact dans l'ACV	34
8.1. La méthode CML	34
8.2. La méthode IMPACT 2002+	34
8.3. La méthode ECO-INDICATEUR 95 ET 99	35

Sommaire

8.4.	La méthode EDIP.....	35
9.	Les logicielles d'ACV.....	36
9.1.	GEMIS.....	36
9.2.	Sima Pro.....	36
9.3.	TEAMTM.....	36
9.4.	CMLCA.....	37

Chapitre III : Analyse de Cycle de Vie de Ciment Portland

1.	Objectif de champ d'étude.....	38
1.2.	Objectif d'étude.....	38
1.3.	Délimitation du champ d'étude.....	38
1.4.	Fonction et unité fonctionnelle.....	39
2.	Inventaire de cycle de vie de ciment portland.....	39
2.1.	Qualité des données.....	40
2.2.	Description du procédé de production de ciment portland	40
2.2.1.	Phase d'extraction de matière première.....	40
a.	Exploitation de calcaire.....	40
b.	Concassage de calcaire.....	40
2.2.2.	Phase de transport.....	40
2.2.3.	Phase de production.....	41
A.	Atelier de préparation de cru.....	41
i.	Dosage et broyage de la matière première.....	42
ii.	Homogénéisation.....	42
B.	Atelier de cuisson.....	42
i.	Tour échangeur.....	43
ii.	Four rotatif.....	43
iii.	Refroidisseur de clinker.....	44
C.	Broyage de ciment.....	45
D.	Expédition de ciment.....	46
2.3.	Bilan quantitatif et qualité des entrées.....	46
3.	L'évaluation des impacts liés à la production de ciment.....	47
3.1.	Méthode de travail.....	48
3.2.	Démarche d'évaluation d'impact.....	49
- 4.	Interprétation des résultats.....	49
4.1.	Réchauffement climatique.....	49
4.2.	Potentiel d'acidification.....	50
4.3.	Potentiel précurseur d'ozone troposphérique (PPOT).....	51
4.4.	Consommation d'énergie cumulée.....	53
	Conclusion générale.....	54
	Recommandation	54
	Annexes A : Géologie.....	56
	Annexes B : Méthodes d'exploitations.....	59
	Bibliographie	64

Résumé

Dans ce travail, une étude détaillée pour déterminer le niveau de consommation d'énergie et l'identification des impacts environnementaux liés à l'industrie cimentaire en Algérie présentée par la société Cimentaire de Hdjar-soud (SCHS) à Skikda. Une analyse des différentes entrées et sorties aux processus de production de Ciment Portland a été faite pour déterminer les différentes sources de pollution tout au long de son cycle de vie.

Pour l'évaluation des impacts environnementaux liés au secteur, l'Analyse de Cycle de Vie a été utilisée.

Les impacts étudiés sont : le réchauffement climatique, l'acidification et la Formation d'ozone troposphérique et l'utilisation des ressources. L'évaluation d'impact a été réalisée par l'utilisation du logiciel GEMIS 4.7.

Les principaux résultats ont montrés que les procédés de production de Ciment portland sont caractérisés par sa grande consommation des énergies fossiles (gaz naturel), et son émission des GES. Le dioxyde de carbone (CO_2) est le principal gaz à effet de serre émis.

La phase de production (objet de l'étude) est la principale source d'émission des GES par 36,87 kg CO_2/UF , l'opération de clinkérisation semble être l'opération qui a le plus d'impact.

Introduction Générale

Introduction Générale

Matière première principale pour la plus part des bâtiments et des ouvrages d'arts (barrage, pont, route, autoroute, tunnel,...etc.), le « Ciment » est la pierre angulaire pour les secteurs de construction et des travaux publics. La demande mondiale de cette matière a connue une croissance constante durant tout le siècle dernier, mais depuis le début du 21^{ème} siècle, la production mondiale a marqué une explosion, la production mondiale a passé de 1,72 à 3,34 milliard de tonnes juste entre le début et la fin de la décennie passée (Raymond., 2017). Poussée par la demande croissante des différents secteurs économiques (travaux publics, bâtiments,...etc.), l'industrie du ciment est devenue l'un des plus grands industries dans le monde (Lacoste., 1957).

Estimée à 4,6 Milliards T/année fin de 2015, le secteur du ciment est classé parmi les plus grands consommateurs d'énergie, cette industrie utilise à elle seule 15% de la consommation mondiale de gaz naturel (Rahmouni, 2017). En plus de sa consommation d'énergie, ce secteur est un grand émetteur des Gaz à Effet de Serre (GES). En effet, ce secteur est responsable de près de 5% de l'émission mondiale de CO₂ (Anhalt., 2013). La combustion de gaz naturel utilisé dans le procédé pour générer la chaleur et l'opération de Clinkerisation sont les principales sources d'émission (Michael, 2001).

Pour assurer son indépendance en cette matière stratégique, et même passer à l'exportation, l'Algérie a mis un programme de développement et de modernisation du secteur cimentaire local, par la construction de nouvelles usines modernes, et la mise à niveau des usines existantes (Ghoualmi, 2016).

Jusqu'à la fin de 2015, le Groupe Industriel des Ciments d'Algérie (GICA) comptait quatorze cimenteries en activité en activité dont 12 entreprise publics, avec une capacité de production qui dépasse 12 millions t/an (GICA, 2015). Avec la mise à niveau des anciennes usines et la rentrer au service des nouvelles usines, le secteur algérien du ciment, va enfin assurer son indépendance et passera vers la fin de 2018 à l'exportation du surplus (Ghoualmi, 2016 ; Benabi, 2017).

L'industrie cimentaire, comme une activité qui assure la matière première pour plusieurs secteurs industriels, est donc considérée comme un pilier pour le développement du pays. Souffrante toujours d'une méconnaissance de ses impacts sur l'environnement, elle nécessite une étude détaillée pour essayer de déterminer ses principales caractéristiques techniques et environnementales. Les principaux objectifs de l'étude sont : déterminer les principaux etrants

Introduction Générale

au procédé ; quantifier les émissions atmosphériques qu'ils lui sont liées ; et enfin, déterminer les principales sources de pollution durant le cycle de vie des produits.

Pour atteindre nos objectifs, on a choisis comme étude de cas non représentatif, la « Société Cimentaire de Hdjar-Soud » (SCHS) située à l'est de la wilaya de « Skikda ». Au premier lieu, on a effectué un stage pratique au niveau de l'installation, où un produit a fait l'objet de notre étude, qui est le « Ciment Portland ». Ensuite, le choix de la méthode a été fait, la méthode utilisée sera l'Analyse de Cycle de Vie (ACV). L'avantage de l'ACV réside dans la prise en compte de toutes les entrées (matière première et énergie), au procédé tout au long de son cycle de vie « du berceau à la tombe » (Lewandowska et al., 2011). Il s'agit d'une méthode standardisée par l'Organisation Internationale de Standardisation (ISO) dans la famille ISO 14040. Cette est réalisée en quatre étapes : la définition des objectifs et du champ de l'étude ; l'inventaire du cycle de vie ; l'évaluation de l'impact du cycle de vie ; et l'interprétation du cycle de vie (Kluppel, 2005 ; ISO, 2006a ; ISO, 2006b ; Finnveden et al. 2009).

Organisation de mémoire

L'organisation de ce mémoire suit la démarche adoptée lors de la réalisation de notre travail. Le secteur industriel qui fera l'objet de notre étude est donc tout d'abord détaillé, l'approche retenue est introduite, et sa méthodologie de réalisation est clairement expliquée dans la partie théorique. La partie pratique quant à elle, illustre à travers une application industrielle, l'ACV d'une tonne de ciment portland fabriqué par la SHCS qui nous a servis comme champ d'application.

Une première partie théorique qui est constituée de deux chapitres :

Le premier chapitre consiste à faire l'état des avancés scientifiques et techniques concernant le ciment, ses différentes catégories, leurs compositions, et leurs méthodes de fabrication.

Le deuxième chapitre présente, le cadre général de l'ACV. Les principales étapes de sa réalisation seront alors détaillées, et ses différentes méthodes existantes seront exposées.

La deuxième partie est constituée d'un seul chapitre :

Le troisième chapitre consiste à réaliser une étude de cas d'une ACV de ciment portland (fixer les principaux objectifs de l'étude, et calculer l'ensemble des entrants, ensuite, l'évaluation et l'interprétation des différents impacts relatifs à l'activité de la SCHS). Les résultats aideront à déterminer la situation actuelle de la société en matière d'environnement.

Chapitre I : Généralités sur le Ciment Portland

1. Rappel historique

Le ciment est un produit très commun dans la civilisation contemporaine, mais il est mal connu du grand public. Sa fabrication est une prouesse technique qui l'on ne soupçonne pas. L'origine des ciments remonte très loin dans l'histoire de l'humanité. Il aurait d'abord été inventé par les Egyptiens. Puis améliorés par les Grecs d'Italie qui le renforcèrent avec des cendres pozzollaniques, usage repris et généralisé par les Romains. Le ciment ne prend son acception contemporaine qu'au XIX^{ème} siècle, lorsque Louis Vicat identifia le phénomène d'hydraulicité des chaux en 1817, en 1824 l'Écossais Joseph Aspdin fait breveter le ciment «Portland» et marque le début de l'ère industrielle de la production de ciment (Bleazard., 2000). La première usine de ciment a été créée par Dupont & Demarle en 1846 en France (Infociments, 2017). Les procédés de fabrication se perfectionnèrent sans cesse. Pour produire une tonne de ciment dans le 19^{ème} siècle il fallait 40 heures, actuellement, il faut 3 mn. Le nom «ciment portland», donné à l'origine en raison de la ressemblance de la couleur et de la qualité du ciment durci avec la pierre de portland (un calcaire exploité à Dorset), et a été conservé pour désigner un ciment obtenu par mélange homogène d'argile et de calcaire, ou d'autres matériaux contenant de la chaux, de la silice, de l'alumine, et de l'oxyde de fer, cuit à la température de clinkérisation puis broyé.

2. Définition

Selon Larousse, un ciment est « une matière pulvérulente formant avec l'eau, ou une solution saline, une pâte plastique liante, susceptible d'agglomérer, en durcissant, des substances variées » (Larousse., 2017).

Le ciment Portland est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière inorganique finement moulue qui, gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise par suite de réaction et processus d'hydratation et qui après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau (LAFARGE, 2009). Dans le langage courant, le terme de ciment peut être source de confusion lorsqu'il est utilisé pour désigner à la fois :

- La poudre de ciment (la forme industrielle telle qu'elle est commercialisée en sac).
- La pâte de ciment au moment de son gâchage à l'eau.
- Le produit obtenu après durcissement.

Dans tout ce qui suit, on distinguera ces différents états en appelant :

- **Ciment anhydre** : (sans eau) la poudre de ciment avant son gâchage à l'eau.

Chapitre I : Généralités sur le Ciment Portland

3. Ciment portland

L'invention du ciment portland est attribuée à l'inventeur britannique « Joseph ASPDIN », celui-ci obtient en 1824 un brevet pour son produit, qu'il nomma ciment portland parce qu'il produisait un béton qui avait la couleur de l'excellente pierre naturelle extraite l'île de Portland situé à L'ouest de l'île de Wright en Angleterre (Bleazard., 2000). Depuis, le nom a été conservé et est utilisé partout dans le monde.

La norme Américaine « ASTM C-150 » définit le ciment Portland comme : « un ciment hydraulique produit par la pulvérisation du clinker, essentiellement composé de silicates de calcium, avec une faible quantité de sulfate de calcium (qui peut être ajouté sous différentes formes) ».

4. Matières premières pour la fabrication du ciment portland

Les sources de matériaux bruts destinés à la fabrication du ciment portland doivent pouvoir fournir les deux principaux composants, la chaux (CaO) et la silice (SiO₂), ainsi des composants secondaires ; l'alumine (Al₂O₃) et l'oxyde de fer (Fe₂O₃). La chaux nécessaire est apportée par des roches calcaires (pierre à chaux), la silice, l'oxyde de fer et l'alumine par des argiles. En traitant ces matières, on y rencontre des composants non nécessaires ou indésirables, ils sont mieux connus sous le nom «des composants mineurs» ; ce sont la magnésie (MgO), les alcalis (Na₂O et K₂O), le phosphore, le titane, le manganèse etc...[6].

4.1. Caractéristiques générales des principaux gisements

4.1.1. Gisement de calcaire

Les calcaires sont des roches sédimentaires, troisième plus abondantes après les schistes et les grès, facilement solubles dans l'eau, composées surtout de carbonate de calcium CaCO₃ mais également de carbonate de magnésium MgCO₃. Quand la roche comporte une proportion non négligeable d'argile, on parle plutôt de marne.

Les roches calcaires sont utilisées comme:

- matière première entrant dans la fabrication du ciment ;
- sable et granulats dans la fabrication des bétons, plus rarement dans les enrobés bitumineux, pour les calcaires les plus durs ;
- Comme fondant dans la fusion du verre (en sable) et dans la fusion des métaux ferreux (en castines) ;

Chapitre I : Généralités sur le Ciment Portland

- Roche à bâtir etc.

a. Formation du gisement

Les calcaires peuvent se former en milieu continental (tufière, stalactites, stalagmites), lacustre, ou (le plus fréquemment) en milieu océanique.

Il existe plusieurs modes de formation des roches calcaires, ou roches carbonatées :

➤ Par précipitation (calcaire chimique)

La lente sédimentation et/ou l'accumulation des éléments microscopiques obtenus par précipitation et leur consolidation par la diagenèse, aboutit à la formation de la roche calcaire. Ces calcaires sont fréquemment fossilifères.

➤ Par action des êtres vivants (calcaire biogène)

Ils peuvent résulter d'une forte accumulation de coquilles ou de carapaces calcaires (intactes ou en débris) ex : craie, ou être biofabriqués (calcaire récifal). Ils sont toujours fossilifères.

➤ Par érosion (calcaire détritique)

Par exemple les brèches calcaires ou omphicalcite.

b. Caractéristiques physiques

À cause des usages dans le bâtiment et les travaux publics, les caractéristiques mécaniques des calcaires sont importantes, d'autant que particulièrement variables. Les calcaires peuvent être soit particulièrement adaptés, soit inutilisables, dans les divers usages auxquels ils sont destinés (il n'y a aucune commune mesure entre un marbre et une craie).

- Dureté = (2,5 - 4).
- Densité = (2,715 - 3 g/cm³).
- Température de fusion=1450 - 1550°C.

c. Caractéristiques chimiques

Le carbonate de calcium se forme dans les milieux aquatiques (le plus fréquemment dans l'eau de mer). Ils résultent de la précipitation d'ions dissous. Cette précipitation suit la réaction suivante :



Chapitre I : Généralités sur le Ciment Portland

Cette précipitation est facilitée par les organismes à coquille ou carapace (mollusques, oursins, coraux, algues planctoniques...), par la respiration des êtres vivants, ou par le brusque dégazage des eaux.

- Formule: CaCO_3 ;
- Constitution: 56% CaO , 44% CO_2 ;
- Impuretés: Fe, Mg, Mn (jusqu'à 8%).

d. Composition minéralogique et couleur

Il est composé d'au moins 70 % de calcite et peut contenir quelques autres minéraux dont les plus courants sont la dolomite, l'aragonite, la silice, la sidérite et l'argile, qui influent sur sa couleur. En général blanc, le calcaire existe aussi dans des teintes de jaune, gris ou brun.

- Le calcaire métamorphisé donne du marbre.
- Le calcaire mélangé avec de l'argile donne de la marne.
- La présence de rognons et de bancs de silex et de chaille témoigne de la précipitation de la silice dissoute dans l'eau de mer, qui est issue de la diagenèse des squelettes enfouis, lors de la formation du calcaire.

4.1.2. Gisement d'argile

Les argiles sont donc des aluminosilicates plus ou moins hydratés et la majorité des matériaux argileux appartiennent au groupe des silico-aluminates phylliteux. Elles sont organisées en couches planes infinies constituées d'unités structurales tétraédriques et octaédriques reliées par leurs sommets. Ce type de structure à très grande surface spécifique associée à des caractéristiques physico-chimiques très particulières, explique la capacité des argiles à admettre de nombreux échanges de cations et d'anions dans le réseau ou adsorbés en surface.

De nos jours, l'utilisation des argiles, notamment celles qui sont riches en SiO_2 (de 45 à 60%) et Al_2O_3 (de 20 à 40%), grâce à sa plasticité, elle connaît un nouvel essor dans la construction, la céramique industrielle et artisanale, l'industrie pharmaceutique et la poterie.

a. Genèse

Les argiles sont de provenances variées, certaines sont d'origine marine, continentales,

Chapitre I : Généralités sur le Ciment Portland

volcaniques marine. Certaines argiles et minéraux argileux sont formés à partir des roches volcaniques comme le basalte. Il s'agit de l'altération de ces roches par différents processus comme le climat (tropical, tempéré, saisons, gel, dégel, pluie, humidité).

b. Principales familles

a) la kaolinite : Elle provient de l'altération chimique des roches siliceuses (feldspaths et quartz) son principal composant est la Kaolinite, ensemble moléculaire théorique $[Al_4(Si_4O_{10})(OH)_8]$.

Sa composition chimique théorique est: $SiO_2 \approx 46.5\%$; $Al_2O_3 \approx 39.5\%$; $H_2O \approx 14\%$.

b) les illites-vermiculites $[K_{0.5}(Al_{0.5}Si_{3.5}O_{10})(OH)_2]$: dérivent des micas par héritage avec des micro-division, ou par ouverture des feuillets suivie d'une disparition totale ou partielle des ions K^+ et sont remplacés par des cations échangeables comme les vermiculites. Il y a deux stades: elles dérivent des muscovites et des biotites.

c) les chlorites: ces argiles n'ont pas de capacité de gonflement, et les échanges sont réduites parce qu'il y a un feuillet supplémentaire s'insérant entre deux autres semblables à la vermiculite.

4.1.3. Gisement de silice

Le terme silice désigne les minéraux d'origine naturelle composés principalement de dioxyde de silicium (SiO_2), ce terme s'applique à tous les produits chimiques de formule SiO_2 , qui peuvent se présenter sous de nombreuses formes, dont le quartz est la forme la plus répandue, c'est un minéral très abondant dans l'écorce terrestre (79% de l'écorce terrestre). C'est une matière utilisés dans les secteurs comme dans les industries cimentières, céramiques, verreries, sidérurgiques, dans le bâtiment, dans le secteur chimique etc.

a. Origine

Principalement, l'origine de la silice est dans le manteau, zone de convection de la chaleur et zone de transformation des substances.

Elle y est prépondérante en masse, sous forme de silicate (péridotites, olivines, pyroxènes...) et "migre" vers la croute océanique d'une part avec les basaltes et vers la croute continentale d'autre part avec les granites. La répartition en pourcentage de la masse terrestre est de 32% pour la silice essentiellement dans le manteau, dans l'écorce mais absente du noyau.

Chapitre I : Généralités sur le Ciment Portland

On trouve la silice dans les zones périphériques des granites (pegmatite par exemple), dans les filons hydrothermaux, dans les roches métamorphiques et sédimentaires.

b. Métamorphose

Dans l'écorce terrestre, on trouve une substance pure SiO_2 (sous quatre variantes) et qui représente environ 12,5% de cette écorce.

➤ une forme colloïdale l'opale (gel solide amorphe) $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ (6 à 12% d'eau). dureté= 5,5 à 6,6 (fragile) couleur blanc laiteux, noir, rouge, brun, bleu, vert; déposée à basse température par les eaux chargées en silice; remplit les fissures dans toutes les roches (principalement sources chaudes, geysers). Constitue le squelette d'organismes tels que les éponges composantes de certaines roches sédimentaires abondant.

➤ une forme microcristalline + pores microscopiques avec calcédoine, cornaline, aspe... dureté = 6 à 7 cristaux de quartz minuscules uniformément colorée gris, gris bleu, gris vert, rouge, noir précipite à partir de solutions riches en silice et tapisse les cavités; forme des amas de substitution dans diverses roches, sources chaudes, roches sédimentaires abondant.

➤ une forme à cristaux fins en bandes ou zones de couleurs circulaires avec agate, onyx... dureté = 6/7 (variétés de calcédoine) mélange de couleurs blanc, vert, brun, rouge, noir remplit les cavités dans les laves fréquent dans les régions volcaniques.

➤ une forme à grands cristaux avec le quartz rose, fumé...cristal de roche, améthyste, citrine... dureté = 7 (fragile) couleur blanc, noir, vert, jaune, rose, violet système cristallin hexagonal dans roches magmatiques, pegmatites, hydrothermales, métamorphiques, sédimentaires constituant important des roches "acides" (granite, quartzite) abondant.

c. Propriétés physiques et chimiques de la silice

Les propriétés physiques et chimiques de la silice sont présentées dans le tableau .1.

Tableau .1. Propriétés physiques et chimiques de la silice

Propriétés physiques	
Apparence	poudre de couleur blanche
Masse moléculaire	60.1 g/mol
Température de fusion	1250 (± 75) °C
Température de vaporisation	2230°C
Solubilité	0,12 g/L (eau)
Densité	2,2, solide
Propriétés Chimiques	
Formule brute	SiO_2
Nom	Dioxyde de silicium

Chapitre I : Généralités sur le Ciment Portland

4.1.4. Minerai de fer

Le minerai de fer est un des éléments minéraux les plus représentés naturellement: près de 5 % de la croûte terrestre. Pourtant, son utilisation n'a pas 3 000 ans en raison de la complexité technologique de son traitement. Il est utilisé dans l'industrie cimentière comme matière de correction dans le ciment.

a. Occurrence et gisements

Le fer est le 6^{ème} élément le plus abondant dans l'Univers, il est formé comme « élément final » de fusion nucléaire, par fusion du silicium dans les étoiles massives. Tandis qu'il compose environ 5 % (en masse) de la croûte terrestre, le noyau terrestre est censé être en grande partie un alliage de fer-nickel, constituant ainsi 35 % de la masse de la Terre dans son ensemble. Le fer est peut-être, en fait, l'élément le plus abondant sur Terre ou du moins comparable (en juste 2^{ème} position) en masse à l'oxygène, mais seulement le 4^{ème} élément le plus abondant dans la croûte terrestre.

La majeure partie du fer dans la croûte est combinée avec l'oxygène, formant des minerais d'oxyde de fer, tels que l'hématite (Fe_2O_3), la magnétite (Fe_3O_4) et la limonite ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$). L'oxyde magnétique ou magnétite Fe_3O_4 est connu depuis l'antiquité grecque.

Par rapport à leur teneur en fer, les minerais sont classés en :

- minerais pauvres : $\text{Fe} \leq 30\%$;
- minerais moyens : $\text{Fe} = 30\% - 50\%$;
- minerais riches : $\text{Fe} > 50\%$.

Les minerais de fer ont une teneur en fer variable selon le minéral ferrifère ; sachant également que l'isomorphisme, presque toujours présent dans les minéraux naturels, réduit la teneur théorique, (tableau.2.)

Tableau .2. Minerais de fer et leurs teneurs en Fer avant et après calcination.

Minéral	Formule chimique	Contenu théorique en fer dans le minéral (%)	Contenu théorique en fer après calcination (%)
Hématite	Fe_2O_3	69,96	69,96
Magnétite	Fe_3O_4	72,4	72,4
Magnésioferrite	$\text{MgO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	56-65	56-65
Goethite	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	62,9	70
Hydrogoethite	$3\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	60,9	70
Limonite	$2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	60	70
Sidérite	FeCO_3	48,3	70

Chapitre I : Généralités sur le Ciment Portland

Pyrite	FeS ₂	46,6	70
Pyrrhotite	Fe _{1-X} S	61,5	70
Ilménite	FeTiO ₃	36,8	36,8

4.1.5. Gisement de bauxite

La bauxite a été découverte en 1821 par le français Berthier, ingénieur des Mines professeur à l'École des Mines de Paris. L'orthographe actuelle est due à H. Sainte-Claire Deville (1861), en référence au nom du village des Baux-de-Provence.

À l'origine, le terme « bauxite » désigne un ensemble de roches alumineuses et ferrugineuses analogues à celles qui furent découvertes aux Baux. Ces roches reposent sur une surface irrégulière, de morphologie karstique, creusée dans des calcaires ou des dolomies.

Après sa découverte en Guinée, cette roche fut successivement retrouvée en Guyane par M. Itier entre 1839 et 1842, et ensuite clairement identifiée dans toute la ceinture intertropicale. En 1981, G. Bardossy a proposé de distinguer les bauxites de karst (sur substrat carbonaté) et les bauxites latéritiques (sur substrats alumino-silicatés variés) des régions intertropicales.

a. Genèse et minéralogie

Les bauxites se forment essentiellement par des processus d'altération superficielle en climat alterné (Saison sèche/saison humide) semi-aride à tropical. Elles ont une densité faible entre 2.3 à 2.7 et forme des masses terreuses et argileuses.

Les bauxites sont composées d'un ou plusieurs oxydes d'aluminium hydratés, plus des quantités variables de silice, d'oxyde de fer, d'oxyde de titane, d'aluminosilicates et d'autres impuretés en quantités mineures ou traces. Les oxydes hydratés naturels d'aluminium sont la boehmite (Al₂O₃.H₂O) et la gibbsite (Al₂O₃.3H₂O).

Les bauxites sont classées en 3 catégories :

- La bauxite monohydratée, dont le composant principal est la boehmite, que l'on trouve surtout sous les climats méditerranéens (France, Grèce, Turquie, etc.) ;
- la bauxite trihydratée, dont le composant principal est la gibbsite, qui se développe surtout dans les zones tropicales (Afrique de l'Ouest dont Guinée, Inde, Australie) ;
- une bauxite intermédiaire, contenant « boehmite » et gibbsite, que l'on trouve principalement aux Caraïbes, Jamaïque...etc.).

5. Principaux procédés et méthodes de fabrication de ciment

Le procédé de fabrication du ciment portland est un procédé complexe. La production du ciment portland qui répond aux normes de qualité exige un savoir-faire, une maîtrise des outils et des techniques de production, et de contrôles rigoureux et continus de la qualité durant tout le procédé.

5.1. Les différents procédés

Il existe quatre grands procédés de fabrication du ciment : la voie sèche, semi-sèche, semi-humide et humide.

5.1.1. En voie sèche

La matière première broyée et séchée passera d'abord dans un préchauffeur à cyclone avec ou sans précalcinateur (de type : AT « air-through » ou AS « air séparé »), puis dans un four tubulaire de 80m. C'est le procédé le plus récent et le plus répandu car il est moins énergivores, mais il nécessite la mise en œuvre de moyens importants de captation des poussières (électrofiltres, filtres cyclones et multicyclones, dépoussiéreurs électrostatiques...).

5.1.2. En voie semi-sèche

La poudre est agglomérée sous forme de boulettes de 10 à 20 mm de diamètre par ajout de 12 à 14 % d'eau, séchée et préchauffée dans une chambre « Grille LEPOL » puis dans le four.

5.1.3. En voie semi-humide

La pâte est d'abord débarrassée de son eau dans des filtres-presses. Le gâteau de filtre-presses est ensuite extrudé sous forme de granules et introduit dans un préchauffeur à grilles ou directement dans un sécheur pour la fabrication du cru (JLB, 2017).

5.1.4. En voie humide

La farine crue est transformée en pâte liquide par ajout d'eau puis broyage et malaxage avant d'être introduite directement dans un four qui sera alors plus long (jusqu'à 200 m). Ce procédé consomme beaucoup de combustible.

5.2 Méthodes de fabrication

Les opérations suivantes sont communes à tous les procédés (Cembureau, 1999) :

- extraction des matières premières,

Chapitre I : Généralités sur le Ciment Portland

- stockage et broyage des matières premières,
- cuisson pour obtention du clinker,
- broyage du clinker et d'additifs pour obtenir le ciment,

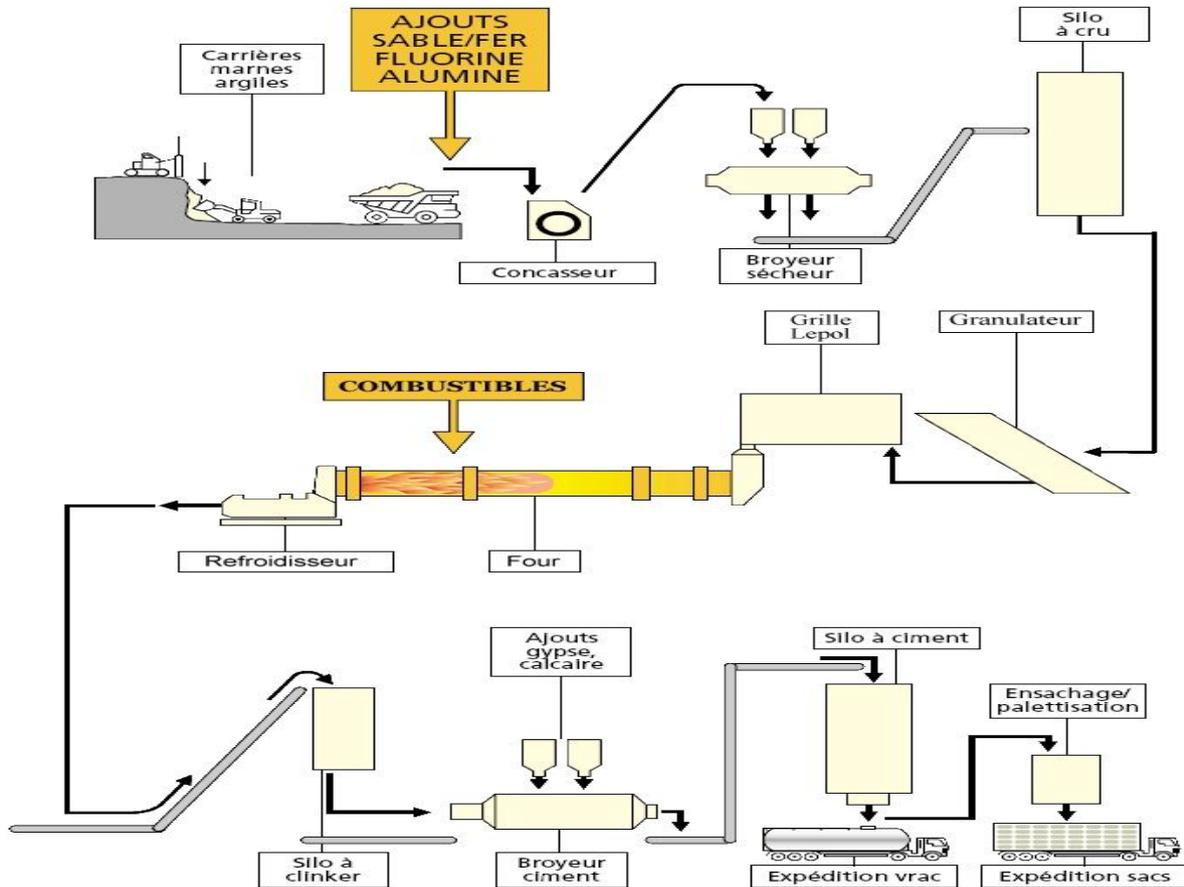


Figure.01. Schéma d'appareillage de la fabrication du ciment

5.2.1. Extraction des matières premières

Les gisements calcaires et argiles naturels (comme les roches calcaires, les marnes, la craie et l'argile) fournissent les matières premières. La silice, l'oxyde de fer et l'alumine présents dans différents minerais et minéraux peuvent être ajoutés pour assurer une même qualité du mélange indépendamment de la qualité de la matière première. Les cendres de centrales thermiques, les laitiers de hauts fourneaux et autres résidus industriels peuvent également être utilisés comme substituts partiels des matières premières naturelles.

Par abattage à l'explosif ou par ripage au bulldozer, les matières premières sont extraites des parois rocheuses de la carrière à ciel ouvert. Les blocs sont repris par dumpers ou bande transporteuse vers un atelier de concassage et réduits en éléments d'une dimension maximale de 50 mm.

5.2.2. Stockage et broyage des matières premières

L'utilisation de halls de stockage dépend des conditions climatiques et de la quantité de matière fine (farine ou cru) produite par l'installation de concassage. Pour une usine d'une capacité de production de 3 000 tonnes/jour, ces bâtiments peuvent contenir de 20 000 à 40000 tonnes de matériaux.

Le pesage et le dosage précis des matériaux introduits dans le broyeur sont importants car ils déterminent la constance de la composition chimique du cru, essentielle pour la stabilité de fonctionnement du four et pour l'obtention d'un ciment de qualité.

a. En voie sèche et semi-sèche

Les matières premières, dans des proportions soigneusement contrôlées, sont broyées en poudre fine et séchées principalement à l'aide des gaz chauds du four et/ou de l'air d'exhaure du refroidisseur.

b. En voie humide ou semi-humide

Les matières premières contenant plus de 20 % d'eau en masse peuvent être broyées avec de l'eau. Le mélange est envoyé dans un délayeur où il est déchiqueté et écrasé par des herses rotatives ce qui le transforme en une pâte. Quand celle-ci est suffisamment fine, elle passe dans des tamis montés dans la paroi du broyeur puis elle est pompée et stockée dans des cuves. Il faut souvent la broyer une nouvelle fois pour obtenir une granulométrie satisfaisante, en particulier si on lui ajoute une autre matière première comme le sable.

En sortant du broyeur, le cru ou la pâte doivent être malaxés et homogénéisés une nouvelle fois pour que le mélange acquière sa rhéologie optimale avant introduction dans les différents types de four. Le cru homogénéisé et stocké dans des silos, sa composition est dans des proportions bien définies :

- carbonate de calcium (CaCO_3): 77 à 83 % ;
- silice totale (SiO_2) : 13 à 14 % ;
- alumine (Al_2O_3) : 2 à 4 % ;
- oxyde ferrique (Fe_2O_3) : 1,5 à 3 %.

5.2.3. Cuisson pour obtention du clinker

Chacune des opérations impliquées dans le processus est importante et doit être correcte, faute de quoi le ciment risque de ne pas avoir la qualité exigée pour son emploi.

Chapitre I : Généralités sur le Ciment Portland

Cependant la cuisson est sans doute l'opération la plus sensible et la plus importante en termes de potentiel d'émissions, de qualité et de coût du produit. En effet, La farine crue (ou la pâte pour la voie humide) est introduite sous forme pulvérulente dans un préchauffeur à cyclone. Cet échangeur gaz/matière réalise la décarbonatation partielle de la farine crue (25% à 30%) qui doit être prête aux réactions du clinkérisation dans le four.

5.2.4. Broyage du clinker et d'additifs pour obtenir le ciment

Pour les ciments composés, du gypse et des constituants secondaires (pigments, résines, laitiers des hauts fourneaux, pouzzolanes) peuvent être ajoutés pour donner au ciment des propriétés spécifiques. La matière est broyée très finement (grains inférieurs à 40 microns) à l'aide de l'un des broyeurs :

- broyeur en circuit fermé avec séparateur aéraulique ou séparateur à cyclones.
 - broyeur vertical à galets (bien adapté aux additions minérales importantes du fait de sa capacité de séchage ainsi qu'au broyage séparé des additions minérales),
 - broyeur à rouleaux (additions minérales relativement limitées, si non sèches ou préséchées).
- Le ciment sera acheminé ensuite vers des silos de stockage à compartiment unique ou à plusieurs compartiments.

6. Différents types et classification des ciments

6.1. Gamme de produit en Algérie

Les principaux ciments selon la classification NA largement inspirée d'AFNOR, en fonction de leur composition et de leur résistance, sont:

- Les ciments CPA, ciments portland purs (composé du seul clinker) ;
- Les ciments CPJ, ciments portland composés, qui contiennent au moins 65% de clinker, Ce sont les plus utilisés en Algérie ;
- Les ciments CHF, ciments de hauts-fourneaux, qui contiennent entre 60 et 75% de laitier de hauts-fourneaux qui pourraient être fabriqués par SCHS ;
- Les ciments CLK; ciment de laitier de clinker, qui contiennent 80% de laitier de HF ;
- Les ciments CLX, ciment de laitier à la chaux ;
- Les ciments prompts.

Les ciments sont également classés en fonction de leur résistance à la compression. Les ciments produits et commercialisés en Algérie, sont essentiellement constitués de CPJ 32,5 et 42,5 ; types les plus demandés et CRS (Ciment Résistant aux Sulfates) largement utilisé dans

Chapitre I : Généralités sur le Ciment Portland

les régions du sud.

6.1.1. Classification en fonction de leur composition minéralogique

Les ciments constitués de clinker et des constituants énumérés précédemment sont classés, en fonction de leur composition, en cinq types principaux par les normes NF P 15-301 et ENV 197-1. Ils sont numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans leur notation européenne (la notation française est indiquée entre parenthèse):

- CEM I : ciment portland (CPA dans la notation française) ;
- CEM II : ciment portland composé (CPJ) ;
- CEM III : ciment de haut fourneau (CHF) ;
- CEM IV : ciment pouzzolanique (CPZ) ;
- CEM V : ciment au laitier et aux cendres (CLC).

Chapitre I : Généralités sur le Ciment Portland

Tableau. 3. Désignation des différents types de ciment en fonction de leur composition minéralogique.

	Ciment Portland	Ciment Portland Composé		Ciment de Haut Fourneau			Ciment Pouzzolanique		Ciment au Laitier et aux Cendres	
	CPA-CEM I	CPJ-CEM II/A	CPJ-CEM II/B	CHF-CEM III/A	CHF-CEM III/B	CLK-CEM III/C	CPZ-CEM IV/A	CPZ-CEM IV/B	CLC-CEM V/A	CLC-CEM V/A
Clinker(K)	≥ 95%	≥ 80% ≤ 94%	≥ 65% ≤ 79%	≥ 35% ≤ 64%	≥ 20% ≤ 34%	≥ 5% ≤ 19%	≥ 65% ≤ 90%	≥ 45% ≤ 64%	≥ 40% ≤ 64%	≥ 20% ≤ 39%
Laitier (S)	*			≥ 36% ≤ 65%	≥ 66% ≤ 80%	≥ 81% ≤ 95%	*	*	≥ 18% ≤ 30%	≥ 31% ≤ 50%
Pouzzolanes (Z)	*			*	*	*			18% ≤	31% ≤
Cendre siliceuse (V)	*	6% ≤ Total	21% ≤ Total	*	*	*	10% ≤ total ≤ 35% (fumée ≤ 10 %)	36% ≤ total ≤ 55% (fumée ≤ 10 %)	Total ≤ 30%	Total ≤ 50%
Fumée de silice (D)	*	≤ 20% (fumée de silice ≤ 10%)	≤ 35% (fumée de silice ≤ 10%)	*	*	*			*	*
Cendres calciques(w)	*			*	*	*	*	*	*	*
Schiste (T)	*			*	*	*	*	*	*	*
Calcaire (L)	*			*	*	*	*	*	*	*
Fillers (F)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

NB : Les constituants marqués d'une étoile (*) sont considérés comme constituants secondaires pour le type de ciment concerné; leur total ne doit pas dépasser 5% (les fillers sont toujours considérés des constituants secondaires).

Chapitre I : Généralités sur le Ciment Portland

6.1.2. Classification en fonction de leur résistance normale

Trois classes sont définies en fonction de la résistance normale à 28 jours; des sous classes « R » sont associées à ces trois classes principales pour désigner des ciments dont les résistances au jeune âge sont élevées. Ces classes sont notées classe 32,5, classe 42,5 et classe 52,5. Elles doivent respecter les spécifications et valeurs garanties du tableau II.5. Les entre parenthèses sont les valeurs garanties lorsqu'elles peuvent être inférieures aux valeurs spécifiées.

Tableau.4. Spécification et valeurs garantie en fonction de la classe.

Classe de résistance	Résistance à la compression (MPa)				Retrait à 28 jrs (1) P 15-433 (µm/m)	Début de prise En 196-3 (min)	Stabilité En 193-3 (mm)
	En 196-1		À 28 jrs				
	Au jeune âge 2 jrs	7 jrs	Mini	Max			
32,5		(17,5)	≥ 32,5 (30)	≤ 52,5	≤ 800	≥ 90	≤ 10
32,5 R	≥ 13,5 (12)		≥ 32,5 (30)	≤ 52,5	≤ 1 000	≥ 90	≤ 10
42,5	≥ 12,5 (10)		≥ 42,5 (40)	≤ 62,5	≤ 1 000	≥ 60	≤ 10
42,5 R	≥ 20 (18)		≥ 42,5 (40)	≤ 62,5		≥ 60	≤ 10
52,5	≥ 20 (18)		≥ 52,5 (50)			≥ 60	≤ 10
52,5 R	≥ 30 (28)		≥ 52,5 (50)			≥ 60	≤ 10

(1) Le retrait spécifié ne concerne que les CPA-CEM I et les CPJ-CEM II.

Nota: La norme FD P 15-010 rassemble les règles et les critères d'utilisation des différentes catégories de ciment en fonction de l'ouvrage et de son environnement. Elle donne également pour chaque produit les utilisations recommandées et les précautions à prendre.

6.1.3. Autres types de ciments

- **Ciments résistants aux sulfates: (C.R. S)**

La teneur en C₃S ne doit pas dépasser 50%, celle du C₃A 5% et la somme de C₃A et C₄AF ne doit pas être supérieure à 22%.

- **Ciments blancs**

Ces ciments sont obtenus à partir des matières premières contenant le moins possible d'oxydes colorants (oxyde de fer, de manganèse, de chrome, de titane ...etc.)

Ces matières sont des calcaires, des craies ou des marbres purs, des argiles Kaolinitiques blanches. Grâce à sa blancheur, le ciment blanc permet la mise en valeur des teintes des granulats dans les bétons apparents.

- **Ciments colorés**

Chapitre I : Généralités sur le Ciment Portland

Ces ciments sont obtenus par addition au clinker blanc de colorants minéraux résistants à la lumière et aux alcalis au cours du broyage ciment. On peut citer le bleu d'outre mer, l'oxyde de chrome, le noir de fumée etc.

- **Ciments alumineux**

Le ciment alumineux est un liant hydraulique prompt obtenu par la cuisson d'un mélange de bauxite et de chaux. Ces ciments sont fabriqués sans ajouts ou parfois en quantité très limitées 2% au maximum pour améliorer certaines de leurs propriétés. Ils sont utilisés pour les travaux nécessitant l'obtention, dans un délai très court, de résistances mécaniques élevées (poutres et linteaux pour le bâtiment, sols industriels, etc.)

- **Ciment à maçonner**

Ce ciment contient en proportions moindres les mêmes éléments actifs que le ciment portland artificiel ; ses propriétés et son comportement dans les milieux courants sont analogues à ce dernier. Mais ses résistances sont moins élevées que celle de ce produit. Ils conviennent bien pour la confection de mortiers utilisés dans les travaux de bâtiment (maçonnerie, enduits, crépis, etc.). Ils peuvent également être employés pour la fabrication ou la reconstitution de pierres artificielles.

6.1.4. Utilisation des différents ciments

- **Le ciment Portland CEM I**

Utilisation: tous travaux en béton armé ou précontraint, coulés sur place ou en préfabriqués. Ils permettent un décoffrage et une mise en service rapide. Il représente 33 % de la consommation totale de ciment.

- **Le ciment Portland composé CEM II**

Utilisation: bétons d'ouvrages courants en élévation, dallages, maçonneries, stabilisation des sols. Il représente 53 % de la consommation totale de ciment.

- **Le ciment des hauts-fourneaux CEM III**

Utilisation: ouvrages situés en milieux agressifs, travaux souterrains, ouvrages pour eaux usées ou industrielles, travaux à la mer.

- **Le ciment pouzzolanique CEM IV**

Utilisation : idem CEM III.

Chapitre I : Généralités sur le Ciment Portland

- **Le ciment au laitier et aux cendres CEM V**

Utilisation : idem CEM.

6.1.5. Utilisation des ciments aux laitiers

- L'utilisation des ciments de laitier est une conséquence de leurs propriétés. Le domaine d'utilisation des CPJ contenant du laitier est pratiquement le même que celui des ciments portland sans addition de même classe de résistance : ouvrage d'art béton armé en élévation, béton précontraint.
- Les ciments à forte teneur en laitier seront préférés aux ciments portland pour les ouvrages exigeant à la fois des résistances mécaniques finales élevées et une bonne tenue à l'action des milieux agressifs (fondation, travaux souterrains, infection, canalisation, égouts, réservoirs, cuves). On les utilise aussi à cause de leur faible chaleur d'hydratation, pour le bétonnage par temps chaud, ainsi que pour les bétonnages de masse (dalles épaisses, piliers, barrages, tous ouvrages massifs).

Les ciments de laitier s'accrochent parfaitement à l'étuvage.

7. Evaluation des impacts sur l'environnement

La fabrication du ciment est à l'origine de polluants dans l'air et d'émission sonores. Chacune de ces opérations engendre des pollutions directes ou indirectes affectant les éléments de la nature. La cuisson du clinker est l'étape qui contribue le plus aux problèmes environnementaux associés à la fabrication du ciment, à savoir la consommation d'énergie et les émissions dans l'air. En fonction des procédés de production mise en œuvre, les cimenteries rejettent des émissions dans l'air et produisent des déchets. Dans de rares cas, des rejets dans l'eau sont possibles. Peuvent s'y ajouter des nuisances sonores et olfactives. Les principales substances polluantes émises dans l'atmosphère sont des poussières, des oxydes d'azote et du dioxyde de soufre. S'y ajoutent des émissions d'oxydes de carbone, de carbone organique total, de métaux, de chlorure d'hydrogène et de fluorure d'hydrogène. Le type et le volume des polluants atmosphériques dépendent de plusieurs paramètres, notamment des intrants (matières premières et combustibles utilisés) ainsi que du type de procédé mis en œuvre. (CE, 2010).

Les pollutions provoquées par l'industrie de ciment ne sont pas uniquement une agression contre l'environnement, mais peuvent être une source de gênes pour les riverains tout en constituant des sources de conflits potentielles. Cependant, cette panoplie de nuisances

Chapitre I : Généralités sur le Ciment Portland

exige une étroite surveillance du fonctionnement des ateliers et la mise en œuvre de moyens capables de réduire les inconvénients, ainsi qu'une maintenance accomplie correctement. Il faut aussi remarquer que si la maîtrise des pollutions est assurée dans l'usine, le personnel employé travaillera dans de meilleures conditions, les qualités du produit et de la vie seront meilleures et l'environnement mieux respecté (ECM, 2011).

Les principales émissions de la fabrication du ciment sont les émissions atmosphériques des fours. Elles sont dues aux réactions physico-chimiques des matières premières et à la combustion des matériaux utilisés pour chauffer les fours. Les principaux constituants des gaz résiduels d'un four à ciment sont l'azote (issu de l'air comburant), le CO_2 (produit par la calcination du CaCO_3 et par la combustion), la vapeur d'eau (produite par la combustion et les matières premières) et l'excès d'oxygène. Dans tous les procédés, les matières solides progressent à contre-courant des gaz chauds de combustion. Cette circulation à contre-courant a un effet positif sur les émissions de polluants, car elle agit comme un lit fluidisé circulant intégré. De nombreux produits gazeux issus de la combustion ou de la transformation des matières premières en clinker sont absorbés par le flux de matières premières circulant à contre-courant ou se condensent. Ce pouvoir d'absorption des matières premières varie avec leur état physico-chimique qui lui-même dépend de leur position dans le four. Par exemple, la matière qui sort de l'étage de calcination contient beaucoup d'oxyde de calcium, ce qui lui donne une grande capacité d'absorption de certains acides, comme le HCl, HF et le SO_2 .

Il existe également des émissions de poussières canalisées provenant d'autres sources, comme les opérations de broyage et de manutention (matières premières, combustible solide et produit). Tous les stocks extérieurs de matières premières et de combustibles solides ainsi que tous les systèmes de transport des matériaux, y compris ceux servant à charger le ciment, constituent un risque potentiel d'émissions de poussières diffuses qui peuvent être importantes si elles ne sont pas prises en compte correctement du point de vue technique ; des problèmes de nuisance peuvent apparaître localement si elles ne sont pas réduites et maintenues à un niveau bas (Khelifa, 2009).

8. La Société Cimentaire de Hadjar Soud (SCHS)

8.1. Historique de la cimenterie de Hadjar-Soud

Dans le cadre du développement du pays et de l'industrialisation économique algérienne et après l'augmentation en consommation du ciment dans notre pays, le

Chapitre I : Généralités sur le Ciment Portland

gouvernement Algérien a fait procéder à des études concernant l'implantation des entreprises régionales tel que, l'ERCE (entreprise régionale du ciment de l'est) qui comprend cinq cimenteries parmi elles la société de ciment de Hadjar Soud (SCHS).

La société possède deux lignes de production par voie sèche, le projet de la fabrication de la première ligne a été lancé en 1969 par la firme française (F.C.B), quatre ans plus tard la première ligne commença à produire. La seconde ligne réalisée en lot a démarré en production en 1975, les ateliers cru et ciment ont été réalisés par la société japonaise KAWASAKI en production en 1975, et le four par CLE (France). A compter de l'année 2008, SCHS est en partenariat avec une entreprise Italienne BUZZI UNICEM à raison de 35% pour cette société et 65% pour l'état Algérienne.

8.2. Situation géographique de la cimenterie SCHS

L'entreprise de Hadjar-Soud « SCHS » est située à 45km de la commune de Skikda dans la commune de Bekkouch Lakhdar et à 45km Ouest de la wilaya d'Annaba. L'usine de traitement se trouve en bordure de la route nationale N °44 et la voie ferrée qui relie Annaba à Constantine.

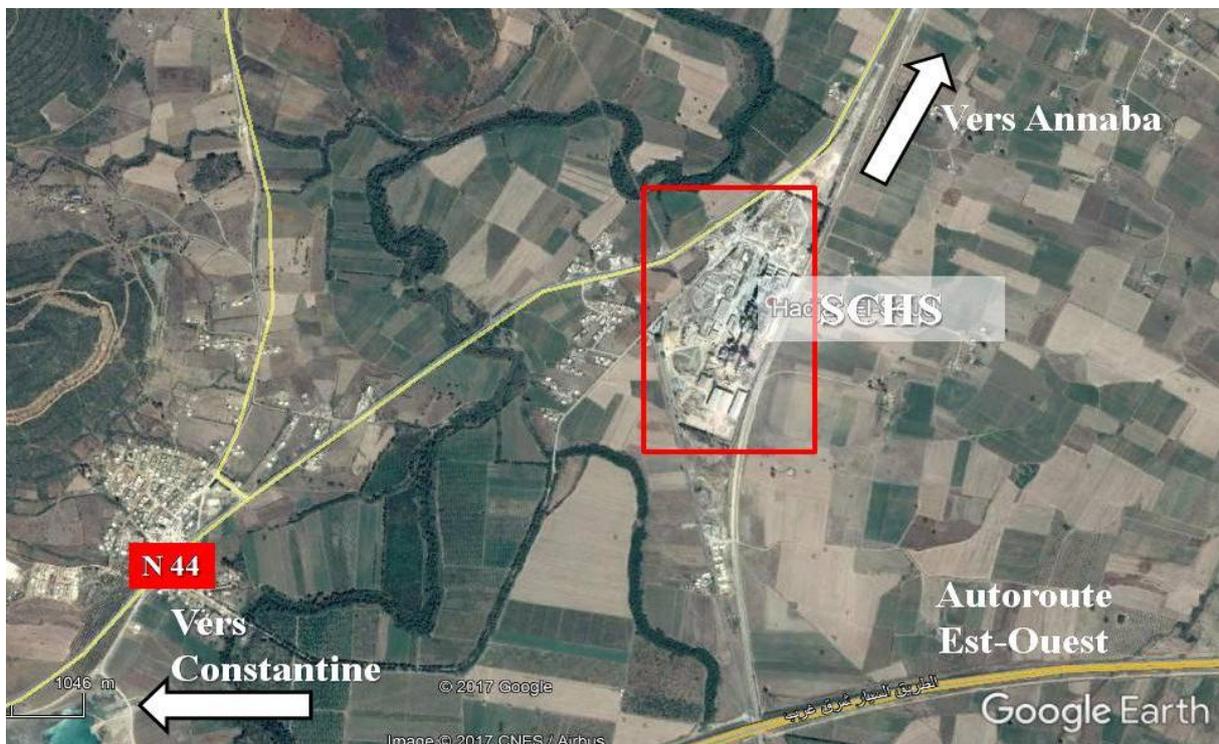


Figure.02. Situation géographique de la société cimentaire de Hdjar- Soud

Chapitre I : Généralités sur le Ciment Portland

8.3. Situation géographique de la carrière

Le gisement de calcaire de « Djebel Safia » est situé à 8 km au nord de la cimenterie. Il se trouve à 59 km d'Annaba et à 114 km de Constantine. Administrativement, le gisement fait partie de la Commune de Ben Azzouz, Daïra d'Azzaba, Wilaya de Skikda.

Cette zone se caractérise par un climat subtropical avec un été chaud et un hiver pluvieux. Le déluge des pluies est irrégulier.



Figure. 03. Situation géographique de la carrière de Hdjar -Soud

Le gisement occupe une zone bien individualisée que coiffe le Djebel Safia. Elle est constituée de quatre sommets principaux dont la dénivelée par rapport à la plaine alluviale de l'Oued El kébir est d'environ 300 m.

La morphologie du gisement est bien marquée mais non abrupte : son relief épouse une topographie à pente douce et dans l'ensemble elle est simple et régulière. Le Djebel Safia se dresse en front à la plaine.

8.4. Capacité de production

SCHS est dotée d'un capital social de l'ordre de 1550 000 000 DA, son potentiel de production annuel est de l'ordre de 1000000 t, elle offre une large gamme de ciments. La participation de la cimenterie à la production du groupe ERCE s'élève à 20,14%, quant à sa part dans la production nationale de ciment est de 8,30%.

Chapitre I : Généralités sur le Ciment Portland

La capacité de production installée est de un million de tonne de produit fini (ciment). La production d'une tonne de clinker nécessite 1,18 T de calcaire. Pour cela, la production d'un million de tonnes de ciment nécessite 1,18 MT de calcaire. Par rapport aux réserves géologiques restantes qui sont de 149.479.721 tonnes de calcaire, la durée de vie de gisement est limitée à 126 ans d'exploitation de la carrière.

8.5. Données de production et chiffres d'affaires

La société des ciments de Hadjar-Soud (SCHS) est une filiale du groupe GICA de capital social de 1 550 000.000 DA, à partir du 01 février 2008 a rentré en partenariat avec le partenaire social italien BUZZI-UNICEM d'un pourcentage de 35%, le groupe GICA est majoritaire de 65 %.

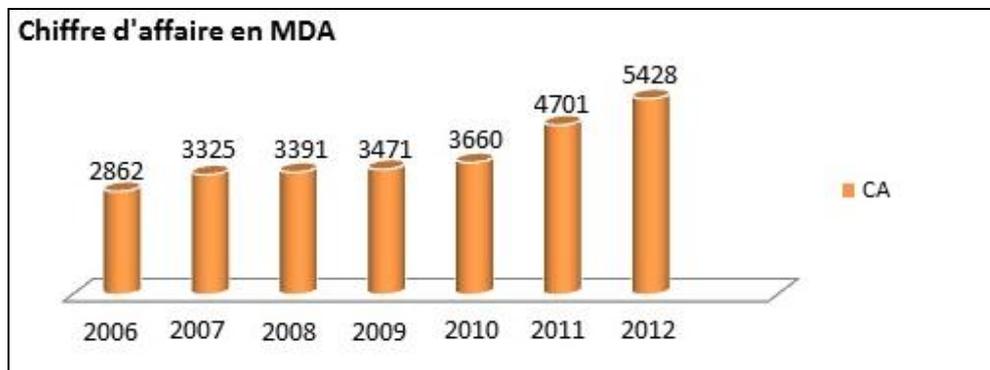


Figure.04. Chiffres d'affaires annuelles de SCHS.

Depuis la signature de partenariat, la SCHS a adopté une stratégie de gestion et de croissance avec des objectifs très ambitieux. Après la mise à niveau des lignes de production, l'entreprise a pu marquer une évolution positive des résultats financiers, ces résultats constituent une preuve d'une politique qualité efficace et adaptée.

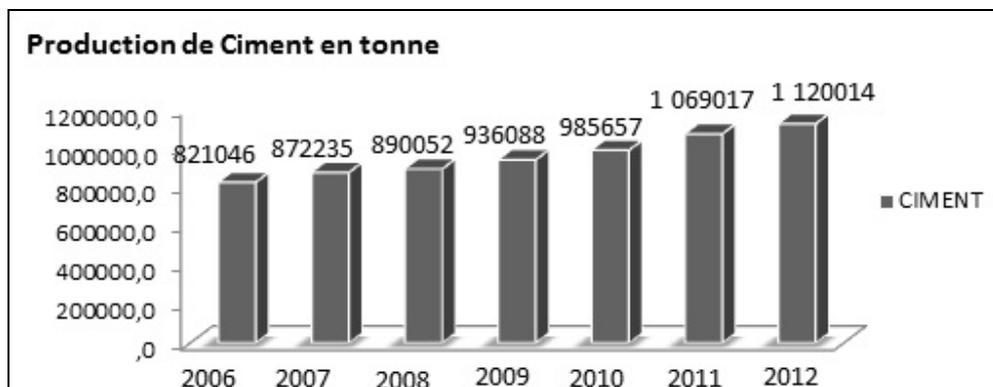


Figure.05. Production annuelle de ciment en T.

Chapitre II : Analyse de Cycle de Vie

1. Historique

L'expression "Analyse du Cycle de Vie" correspond à l'anglais Life Cycle Assessment (LCA). Les premières études de ce type ont été réalisées aux États-Unis dans les années 60, justifiées par des préoccupations visant la réduction des consommations des matières premières et d'énergie.

L'apparition des Analyses de Cycle de Vie est due :

- aux premières études visant l'optimisation des consommations énergétiques,
- à l'évolution de ces études, pour prendre en compte les consommations des ressources énergétiques, ce qui a permis d'améliorer l'analyse des « entrées » (consommations de matières premières et d'énergie) et de tirer plus de renseignements,
- à l'évolution des études précitées par la prise en compte non seulement des « entrées » mais aussi des « sorties » (émissions et pollutions) des systèmes industriels de production considérés.

2. Définitions et objectif de l'ACV

2.1. Définition

L'analyse de Cycle de Vie (ACV), est une méthode qui évalue l'impact environnemental d'un produit ou d'une activité de production « procédé » d'une manière simple et efficace. Autrement dit, elle définit l'impact des différentes étapes de fabrication d'un produit sur l'environnement.

« L'analyse de cycle de vie de l'environnement du travail vise à cataloguer et évaluer les impacts potentiels de l'environnement du travail sur les individus tout au long du cycle de vie d'un système de produit » (Patoine, 2012). Le point de départ de la méthode est qu'elle prend en compte toutes les consommations de l'objet en analyse des sa naissance jusqu'à sa mort représentant l'approche du « berceau à la tombe ». Elle est utilisée dans nombreux travaux scientifiques.

Le concept du berceau a la tombe s'exprime en quatre grandes phases de production : (Patoine, 2012)

Chapitre II : Analyse de Cycle de Vie

Phase 1 : « Extraction des matières premières » : Cette phase comprend la fabrication du produit : extraction des ressources, transformation de la matière premières.

Phase 2 : « Production » : Cette phase décrit la fabrication du produit.

Phase 3 : « Utilisation » : Cette phase prend en considération le transport, l'utilisation, et le maintien du produit.

Phase 4 : « Fin de vie » : Elle correspond à la fin de vie du produit, et étudie les différents scénarios de fin de vie possibles (recyclage, réutilisation, incinération, enfouissement, ...etc.).

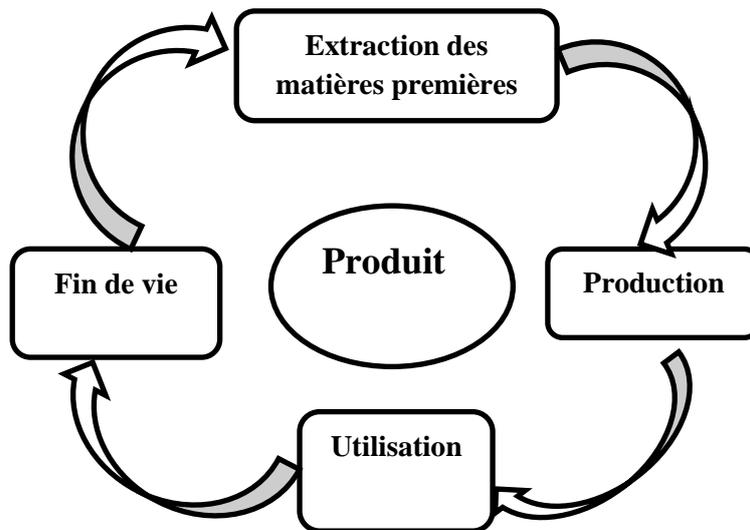


Figure.06. : Schéma représentant le cycle de vie d'un produit

Selon l'organisation internationale de normalisation (ISO), l'ACV est : « une technique qui aborde les aspects environnementaux et les impacts potentiels sur l'environnement tout au long du cycle de vie d'un produit, depuis l'acquisition des matières premières à la production jusqu'à l'élimination finale (du berceau à la tombe) » (ISO, 14044).

C'est pourquoi les entreprises qui choisissent de produire une analyse de cycle de vie doivent déclarer une décision environnementale et respecter les normes de l'organisation internationale de normalisation : ISO 14025 :2006, ISO 14040 :2006 et ISO 14044 :2006 (Patoine, 2012).

2.2 Les objectifs de l'ACV (Seburon, 2014)

- ✓ L'ACV a pour objectif de présenter une vision globale des impacts générés par les produits.

Chapitre II : Analyse de Cycle de Vie

- ✓ Elle a aussi un rôle important pour l'acceptation des techniques par la société une fois qu'elle privilège les meilleurs, elle informe les parties prenantes en mesurant les impacts de chaque étape sur l'environnement.
- ✓ Le troisième objectif est de collecter les informations pour toutes les phases de production au contraire des autres techniques, l'ACV nous permet de découvrir les liens entre chaque phase et le concept de développement durable,
- ✓ Chercher les meilleures procédures à prendre pour éliminer ou minimiser les impacts.

3. Les principales applications de l'ACV

- ✓ Analyser l'origine des problèmes relatifs à un produit spécifique.
- ✓ Améliorer le procédé d'un produit donné par observation des points chauds « hot spots » durant son cycle de vie.
- ✓ Concevoir de nouveaux produits en tenant compte de l'environnement lors de leurs conceptions.
- ✓ Comparaison des procédés ou des produits entre eux en sélectionnant le plus respectueux de l'environnement par comparaison de leurs cycles de vie.
- ✓ Valorisation de filières.
- ✓ Eco-labellisation des produits c'est-à-dire favorisé par des labels des produits qui sont jugés comme ayant le plus faible impact environnement à tous les stades de leur vie.
- ✓ Mise en place de réglementation.

4. Les avantages de l'ACV

Grace à sa vision globale (de berceau à la tombe), l'ACV permet la quantification des impacts environnementaux liés à tout le cycle de vie de produit ainsi qu'à tous les processus amont qui contribuent directement ou indirectement à la fabrication du produit, cette vision, permet aussi de prendre en compte le transfert des polluants (Matthew J.T, 2011 ; Micheau, 2011).

- ✓ Notion de cycle de vie : propre à l'ACV, tient compte des transferts de pollution
- ✓ Quantification des impacts : analyse multi- critères, facteurs d'impact
- ✓ Prise de décision
- ✓ Intérêt marketing et financier pour les entreprises.

L'ACV permet la quantification des impacts environnementaux potentiels d'un produit grâce à une vision globale sur son cycle de vie. Par cette méthodologie il est possible également d'identifier les déplacements de pollution, d'évaluer le type d'impact

Chapitre II : Analyse de Cycle de Vie

environnemental dominant dans la réalisation d'un produit, ou encore d'identifier certains éléments particuliers dont la contribution est majeure en termes d'impacts environnementaux. Enfin, il est aussi possible d'avoir une perspective des différents types d'impacts plutôt que de se limiter à un type d'impact particulier (c'est donc une approche multi-impacts et multicritères).

La méthodologie d'Analyse du Cycle de Vie peut être utilisée pour faire des choix à portée globale (choix d'une politique environnementale, comme l'intérêt du recyclage de certains produits) ou locale (choix de design et de production pour un produit).

Parce que certains paramètres ne peuvent pas être quantifiés en totalité, l'ACV ne pourra jamais devenir un outil universel et complet. Il est quasi-impossible par exemple d'obtenir l'intégralité des flux utilisés pour un produit ou de fixer les limites exactes d'un système. Compte tenu de ce fait, il faut parfois faire appel à des données génériques ou restreindre le périmètre de l'étude en utilisant des données limitées (moins précises).

5. Méthodologie de l'ACV

La première norme d'ACV a été publiée par « l'International Standard Organisation » (ISO) en 1998, aujourd'hui, les exigences liées à la pratique de l'ACV sont répertoriées dans la série des normes ISO 14040 (Seburon, 2014).

- **Norme ISO14040** : Management environnemental. Analyse du cycle de vie : principes et cadre (ISO, 2006a).
- **Norme ISO14044** : Management environnemental. Analyse du cycle de vie : Exigences et lignes directrices (ISO, 2006b).

6. La réalisation de l'ACV

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

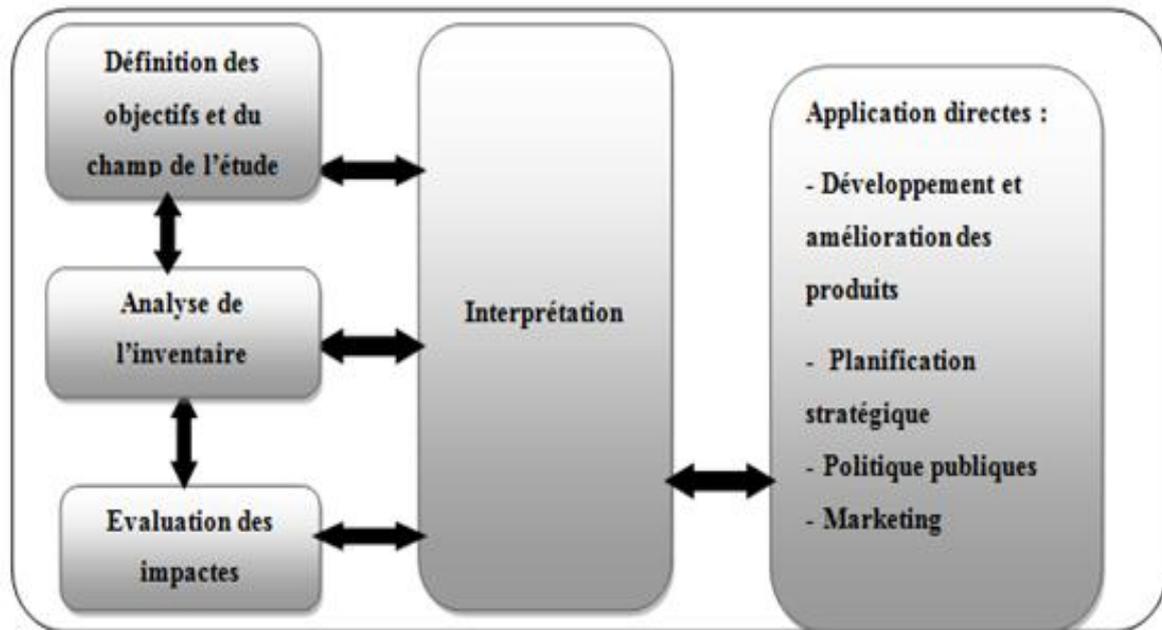


Figure.07. Principales phases de l'analyse de cycle de vie (ISO 2000b)

6.1. Définition des objectifs et du champ de l'étude

En première lieu, cette phase consiste à décrire le contexte de l'étude, ses objectifs et son cadre d'application. Ensuite, elle définit la fonction étudiée dans l'étude et définit l'unité fonctionnelle qu'elle représente cette fonction. Enfin, elle détermine le champ d'étude et délimite ses frontières (Makhlouf, 2015).

6.1.1. Objectifs de l'étude

L'objectif d'une étude ACV doit indiquer clairement la définition et description de produit, de procédé ou d'activité. La définition des objectifs doit indiquer aussi le contexte dans lequel est faite l'étude, et identifier les limites et les effets sur l'environnement qui seront pris en considération dans l'étude. La définition de l'objectif est également faite pour but de définir la destination et les utilisateurs des résultats (Matthew J.T, 2011).

6.1.2. Le champ d'étude

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

Chapitre II : Analyse de Cycle de Vie

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

6.1.3. La fonction

La fonction dans l'ACV est le service utile rendu par le produit ou le processus étudié (ISO, 2006a), Il est important de comprendre que l'analyse du cycle de vie nécessite, pour une portée comparative, d'étudier la fonction du produit. En effet, en n'étudiant que le produit en lui-même, il deviendrait difficile de comparer des produits remplissant la même fonction mais de manière différente comme la voiture et le transport en commun dont la fonction commune est de déplacer des personnes. À ce titre une Analyse fonctionnelle s'avère fortement recommandée. C'est en définissant correctement la fonction étudiée qu'il est possible de comparer des produits entre eux. Une bonne définition de la fonction permet également de définir correctement les frontières du système à l'étude. Il est courant qu'un produit ait plusieurs fonctions (Makhlouf, 2015).

6.1.4. L'unité fonctionnelle

L'unité fonctionnelle (UF) quantifie la fonction du système étudié (Cooper JS, 2003). L'unité fonctionnelle joue un rôle indispensable dans le cas d'une étude de comparaison entre deux ou plusieurs produits, ou l'étude pour en vue d'améliorer les performances environnementales d'un produit ou d'un processus. Les données qui seront recueillies lors de la phase d'inventaire seront associées à l'unité fonctionnelle.

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

6.2. Inventaire de cycle de vie

La phase de l'ICV comprend la collecte et le traitement des données nécessaires pour la réalisation de l'ACV. La réalisation de l'ICV consiste à quantifier les différents flux intrants et sortant dans le système, les flux de matières premières, d'énergies et des polluants émissent, l'ensemble de ces flux est identifié et caractérisé par sa nature, par la qualité des données collectées pour le bilan et leur mode d'acquisition ou leur degré de représentativité

Chapitre II : Analyse de Cycle de Vie

(Basse-Mens, 2005). Ce bilan « énergie-matière » est normalisé par rappor.00t à l'unité fonctionnelle définie au préalable.

6.2.1. Qualité des données

La fiabilité des résultats de l'étude d'ACV dépend fortement de la qualité des données employées dans l'étude. La qualité des données a été toujours une limite pour la réalisation d'une ACV.

6.3. Evaluation des impacts environnementaux

Cette troisième phase consiste à traduire les quantités consommées d'énergie et de matières et les émissions de substances en termes d'impacts sur l'environnement et la santé humaine (Guinée J.B, 2002).

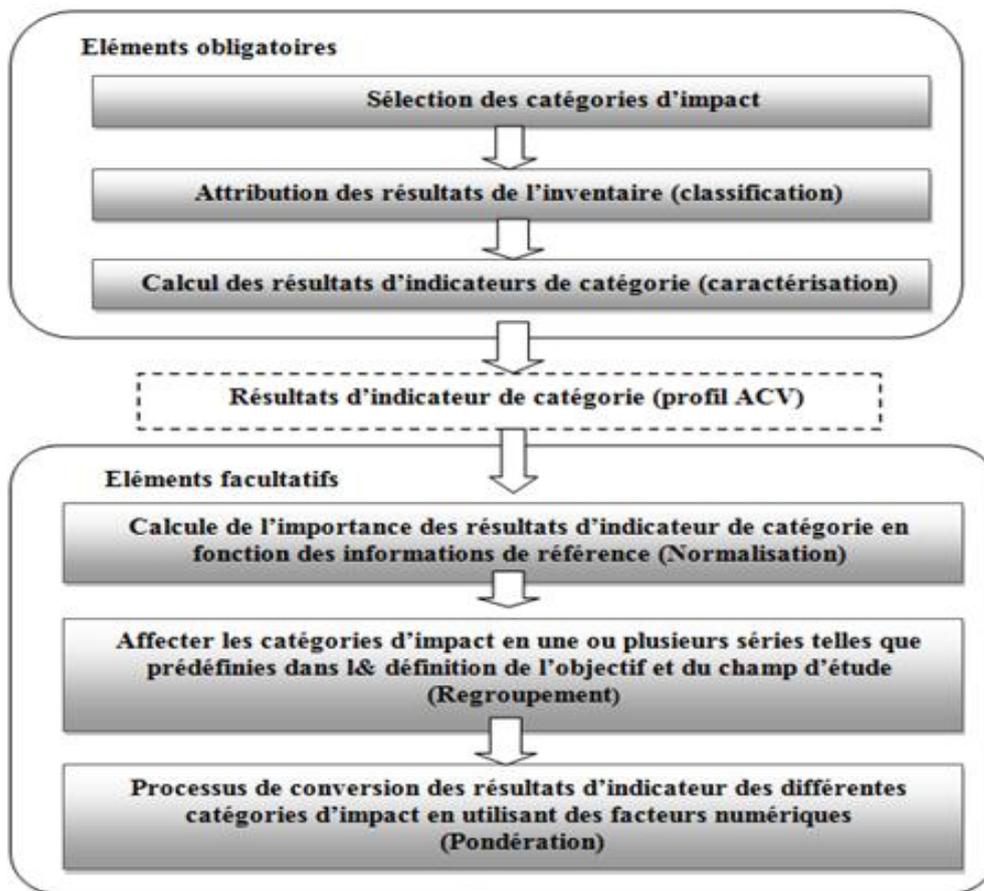


Figure.08. Les différents éléments de la phase d'évaluation des impacts environnementaux (Makhlouf, 2015).

6.4. Interprétation des résultats

La phase d'interprétation consiste à évaluer la fiabilité des résultats de l'étude, et les hypothèses telles que l'unité fonctionnelle, les objectifs, et le champ de l'étude. Cette phase

Chapitre II : Analyse de Cycle de Vie

ne se base pas uniquement sur la phase précédente (évaluation des impacts), elle intervient à chacune des trois phases précédentes. Elle permet de valider les différentes phases et d'identifier les éventuels problèmes rencontrés au cours de l'étude. Cette phase est aussi pour but de montrer les limites et les vulnérabilités de l'étude. Les données manquantes, incomplètes, ou de ressources ou qualité incertaine doivent être identifiées et justifiées (Makhlouf, 2015).

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

- ✓ Analyse d'amélioration : les étapes qui génèrent le plus grand impact.
- ✓ Etude d'incertitudes : simulation statistique, regard critique.
- ✓ Evaluation environnementale et socio-économique.
- ✓ Vérification des données et hypothèses.

7. Les catégories d'impact

7.1. Épuisement des ressources fossiles

Cet indicateur concerne l'extraction de ressources naturelles abiotiques considérées comme non renouvelables, c'est-à-dire consommées à un rythme supérieur à celui de leur élaboration naturelle. L'indicateur est exprimé en kilogramme équivalent d'antimoine (kg eq. Sb).

7.2. Énergie primaire non renouvelable

Elle représente la somme de toutes les sources d'énergie qui sont directement puisées dans les réserves naturelles fossiles telles que le gaz naturel, le pétrole, le charbon, et l'énergie nucléaire. L'indicateur est exprimé en MJ.

7.3. Réchauffement climatique

On appelle « effet de serre » l'augmentation de la température moyenne de l'atmosphère induite par l'augmentation de la concentration atmosphérique moyenne de diverses substances d'origines anthropiques telles que le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), ou le protoxyde d'azote (N₂O).

Le rayonnement solaire est réémis par la surface de la terre sous forme de rayonnement infrarouge, qui est lui-même partiellement absorbé par diverses espèces

Chapitre II : Analyse de Cycle de Vie

chimiques présentes dans l'atmosphère. Le bilan radiatif détermine la température moyenne de la planète. La présence de substances « à effet de serre » donne une température telle qu'elle permet la vie sur terre (sans cet effet, la température serait de l'ordre de -15°C). Le déséquilibre écologique provient donc non pas de l'existence de cet effet, indispensable à la survie de toute espèce, mais de l'augmentation de celui-ci.

L'unité retenue pour la contribution d'une substance à l'effet de serre est l'équivalent CO_2 en masse. Le GWP (Global Warming Potential) d'une substance gazeuse est le potentiel d'effet de serre de l'émission instantanée d'un gramme ou d'un kilogramme de la substance par rapport au CO_2 .

Les matériaux à base de biomasse (bois, carton...) jouent un rôle particulier vis-à-vis du réchauffement climatique. En effet, ces matériaux contiennent du carbone qui provient de la quantité de CO_2 absorbée pendant la phase de croissance de l'arbre ou de la plante. Pendant toute la durée de vie de ces matériaux, ce carbone est ainsi séquestré. Lors de la combustion de ces matériaux (en cas d'incinération en fin de vie par exemple), la quantité de CO_2 rejetée pendant la combustion correspond à cette quantité de CO_2 séquestrée. Le bilan global en termes de rejet de CO_2 est donc nul. Pour ce CO_2 d'origine renouvelable, on parle de CO_2 biogénique. L'unité retenue est le kg de CO_2 eq.

7.4. Acidification terrestre

Le dépôt de substances inorganiques de l'atmosphère sur le sol modifie son acidité. Des substances comme les sulfates, les nitrates ou les phosphates peuvent ainsi perturber le développement de la végétation, pour laquelle un optimum d'acidité est clairement défini. Deux facteurs caractérisent donc cet impact : le facteur de devenir, traduisant le parcours de la substance au long de sa vie et les milieux d'exposition, et le facteur d'effet, exprimant la toxicité de la substance. Cet impact s'exprime en kg eq. SO_2 .

7.5. Oxydation photochimique

La pollution photochimique (ou pollution photo-oxydante) est un ensemble de phénomènes complexes qui conduisent à la formation d'ozone et d'autres composés oxydants précurseurs dans la basse couche de l'atmosphère (ozone troposphérique). L'ozone formé à ce niveau a des effets néfastes sur la santé humaine et sur les végétaux. L'indicateur est exprimé en kg de composés organiques volatils, méthane exclu (kg COVNM). La pollution photochimique est un impact local et est par conséquent difficile à traduire en termes d'indicateur. En effet, les facteurs de caractérisation utilisés dans les bases de données ACV

Chapitre II : Analyse de Cycle de Vie

ne peuvent prendre en compte les spécificités géographiques locales, ce qui nuit à la robustesse de l'indicateur.

7.6. Détérioration de la couche d'ozone

Cet impact potentiel est provoqué par des réactions complexes entre l'ozone stratosphérique et des composés tels que les Chlorofluorocarbures (CFC). L'amenuisement de la couche d'ozone se traduit entre autres par une filtration naturelle des rayonnements ultra-violet moins efficace. L'unité retenue est le kg éq. CFC-11 (trichlorofluorométhane). Le protocole de Montréal encadre la production et la consommation des substances contribuant à l'amenuisement de la couche d'ozone. Ce protocole prévoit l'arrêt total de la production des chlorofluorocarbures en 2010 et celle des hydrochlorofluorocarbures en 2020 pour les pays industrialisés. Cet enjeu n'est ainsi plus considéré comme un enjeu majeur.

7.7. Formation des micros particules (matière particulaire)

Les matières particulaires sont des solides ou liquides en suspension dans un gaz, en l'occurrence l'air ambiant. La santé humaine peut être mise en danger si ces particules s'avèrent être des substances chimiques pouvant affecter un organisme, comme c'est le cas sur beaucoup de lieux de travail dans l'industrie lourde, l'industrie chimique, etc. Le terme PM10 est couramment utilisé pour désigner des particules de matière dont le diamètre est inférieur à 10 μm , c'est l'unité de caractérisation de cette catégorie d'impact : kg éq. PM10.

7.8. Radiation ionisante

Les radiations ionisantes sont la conséquence de la présence d'éléments radioactifs dans l'environnement. Les niveaux d'exposition sont calculés à partir de modèles dérivant les émissions radioactives provenant des industries utilisant des produits radioactifs (par exemple la production d'énergie nucléaire). La substance de référence est l'uranium 235, émis dans l'air, les impacts se comptent donc en kg éq. 235U.

7.9. Eutrophisation aquatique

L'eutrophisation d'un milieu aqueux (eau douce ou mer) est la conséquence d'un apport de nutriments d'origine anthropique. Ces nutriments sont le plus souvent introduits sous la forme de produits phosphatés ou azotés, très présents dans les engrais par exemple. Ces substances encouragent ainsi la croissance rapide d'algues qui mettent en danger la biodiversité du milieu en privant le reste des organismes végétaux de CO_2 et de lumière. En conséquence, le niveau d'oxygène du milieu baisse considérablement, menaçant ainsi la

Chapitre II : Analyse de Cycle de Vie

survie de la faune et la flore. L'unité retenue est le kilogramme d'équivalent phosphate (kg éq. PO_4^{-3}).

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

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

a) méthodes orientée problème « midpoint » : qui limitent la modélisation quantitative à un stade relativement précoce de la chaîne de cause à effet pour limiter les incertitudes et grouper les résultats selon les thèmes comme le changement climatique ou l'écotoxicité.

b) méthodes orientées dommage « endpoint » : qu'ils essaient de ramener la modélisation de la chaîne de cause à effet jusqu'à les dommages, souvent avec une haute incertitude.

8.1. La méthode : CML

Une méthode d'ACV orientée problèmes est développée par l'Institut des sciences environnementales de l'Université de Leiden (CML). Elle se concentre sur une série de catégories d'impact environnemental exprimé en termes d'émissions dans l'environnement ou l'utilisation des ressources. Elle permet d'établir une valeur monétaire artificielle (prix fictif) pour chaque unité de l'impact environnemental et de comparer les résultats pour les différentes catégories d'impact environnemental avec l'autre. Les catégories d'impacts utilisés dans CML sont: les effets sur l'épuisement des combustibles fossiles et des matières premières; réchauffement global, la couche d'ozone, la santé humaine, la santé de l'eau douce, les écosystèmes marins et terrestres; smog; pluies acides et l'eutrophisation (Impact 2002+, 2014).

8.2. La méthode : Impact 2002+

La méthode Impact 2002+ est développée par l'Institut Fédéral Suisse de Technologie de Lausanne (EPFL). Cette méthode propose une mise en œuvre possible d'une approche problème/ dommage combinée. Le schéma global de la méthode lie tous les types de résultats de l'ACV via 14 catégories problèmes (toxicité humaine, effets respiratoires, rayonnements

Chapitre II : Analyse de Cycle de Vie

ionisants, déplétion de la couche d'ozone, oxydation photochimique, écotoxicité aquatique, écotoxicité terrestre, acidification terrestre/nitrification, acidification aquatique, eutrophisation aquatique, occupation des sols, réchauffement global, énergie non renouvelable, l'extraction minière) à quatre catégories de dommages : Santé humaine ; Qualité de l'écosystème ; Changements climatiques ; et Ressources) (CML, 2007).

8.3. La méthode : Eco-Indicator 95 et 99

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

Les données d'impact dans Eco-Indicator sont pondérées selon un processus d'évaluation sociale. Par exemple, la méthode Eco-Indicator 95 définit qu'une mort sur 1 000 000 d'habitants équivaut à 5 % de perte de surface dans un écosystème intact. Cette pondération permet de comparer différents types d'effets environnementaux. Les résultats peuvent ensuite être présentés sous la forme d'un score unique, le score Eco-Indicator. Les facteurs d'impact pour l'Eco-Indicator 99 sont collectés et publiés dans un tableur par l'Institut des sciences environnementales, Université de Leiden, Pays-Bas, et sont fournis par Pré Consultants, éditeur du logiciel SimaPro (Solidworks).

8.4. La méthode : EDIP

La méthode danoise pour la conception environnementale pour les produits industriels (EDIP) a été élaborée entre 1991-1996 par une équipe comprenant: cinq grandes entreprises danoises dans l'industrie électromécanique, la Confédération des industries danoises, l'Institut de développement de produits (chef de projet), et l'Agence de protection de l'environnement danoise (sponsor). Cette collaboration entre les trois acteurs, l'industrie, l'université et les autorités a fourni, l'équilibre entre les besoins de l'opérationnalité et la profondeur scientifique des méthodes tout au long de projet. La méthode est en conformité avec les exigences de la norme ISO 14040 et les normes qu'elles l'ont suivis. (EDIP, 1999).

Chapitre II : Analyse de Cycle de Vie

9. Les logiciels d'ACV

Plusieurs compagnies et instituts de recherche ont développés des logiciels pour les utilisés en ACV. Le but principal pour ça est la grande quantité des données qu'il faut enregistrer et traiter pour la réalisation d'une étude ACV.

9.1. GEMIS

Le logiciel GEMIS 4.7 (2010) permet d'évaluer les impacts des produits sur l'environnement. Il contient d'une part une méthodologie d'évaluation des impacts et d'autre part une base de données de matériaux, procédés de fabrication, moyens de transports, énergies, permettant de modéliser le produit. La base de données comprend une liste de produits, de processus et de scénarios. Nous pouvons introduire nos propres produits, processus et scénarios. (GEMIS 4.7, 2011).

9.2. SimaPro

Sima Pro est développé par la société Hollandaise « Pré Consulting » en 2000, il contient 7000 module dans sa base de données. L'avantage de ce logiciel, c'est qu'il il contient plusieurs bases de données environnementales, dont la plus riche et la plus complète « Ecoinvent » (SimaPro 7, 2012). Plusieurs méthodes d'évaluation d'impact sont disponibles dans SimaPro, des méthodes monocritère, multicritères, des méthodes d'indicateurs de flux, ou d'indicateurs d'impacts, des méthodes destinées à vulgariser les résultats pour les rendre compréhensibles et accessibles au grand public, d'autres plus complexes destinées à un public d'experts. Plus de son évaluation d'impact selon la méthode « Impact 2002+ », SimaPro utilise différentes méthodes de calculs tels que « CML1992 » et « Eco-indicateur 99 » (Jolliet O, 2003).

9.3. TEAM TM

TEAMTM est un outil puissant développé par Société française « EcoBilan ». La sélection et la définition des entrées et sorties est simple en utilisant la barre d'outils du logiciel. L'utilisation de formules pour spécifier les méthodes d'allocation pour chaque unité de traitement est une fonctionnalité unique de TEAM TM. Le calcul d'inventaire d'ACV de n'importe où dans le système est une autre fonctionnalité flexible de TEAM TM. Le modèle contient dix catégories contiennent 216 fichiers de données individuelles pour les produits et la production de matériaux, production d'énergie et de transport. Les catégories sont : les tissus mous et le papier, la pétrochimie et les plastiques, les produits chimiques inorganiques; acier; aluminium, autres métaux, le verre, la conversion d'énergie, le transport, et la gestion

Chapitre II : Analyse de Cycle de Vie

des déchets. Cet outil utilise des formules et des variables qui permettent le développement d'un système dynamique qui facilite l'analyse de sensibilité. La sortie de l'inventaire est affichée sous forme de tableau à travers le modèles "Eco-view"(TEAM 5.2, 2014).

9.4. CMLCA

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

1. Objectif et champ d'étude

1.2. Objectif de l'étude

Cette étude s'inscrit dans le cadre de la réalisation d'un mémoire de fin d'étude pour l'obtention d'un diplôme de master en « Ressources Minérale et Environnement » (RME). Le but ultime de ce travail peut être résumé dans une évaluation des impacts environnementaux relatifs à l'industrie de ciment, cas de : « La Société Cimentaire Hdjar-Soud » (SCHS). Les points cités ci-dessous sont les principaux objectifs attendus de cette étude :

- appliquer la démarche d'Analyse de Cycle de Vie à une filière importante dans l'économie locale ;
- réaliser un inventaire de différentes matières et énergies entrantes dans le procédé de production de ciment ;
- établir un bilan non exhaustif des différents sortants du procédé vers l'environnement ;
- et, déterminer les principales sources de pollution durant tout le cycle de vie de ciment portland.

1.3. Délimitation du champ d'étude

L'analyse du cycle de vie environnementale réalisée dans cette étude est de type « de berceau à porte », depuis l'extraction de matière première (calcaire), jusqu'à la mise en vente des produits finis (ciment portland). Elle inclut les différentes activités liées à la production en décrivant toutes les opérations unitaires.

Une modélisation primaire peut se faire sous la forme d'un arbre de synthèse des processus pour donner un aperçu du système étudié et les différentes étapes qui composent la phase de production qu'il est la principale phase de cycle de vie de ciment.

La figure ci-dessous (figure 09) illustre les différents processus unitaires du produit objets de l'étude. Pour prendre en compte les matériaux et l'énergie ainsi que les impacts sur l'environnement, deux limites du système ont été définies pour cette analyse.

La frontière cumulative de système (cadre avec ligne discontinue) présente les matériaux, la consommation d'énergies associées à tous les procédés. La deuxième frontière (cadre avec ligne continue) est la limite du système étudié ; cette seconde frontière présente les processus pour lesquels des données primaires ont été recueillies directement auprès des

unités de production.

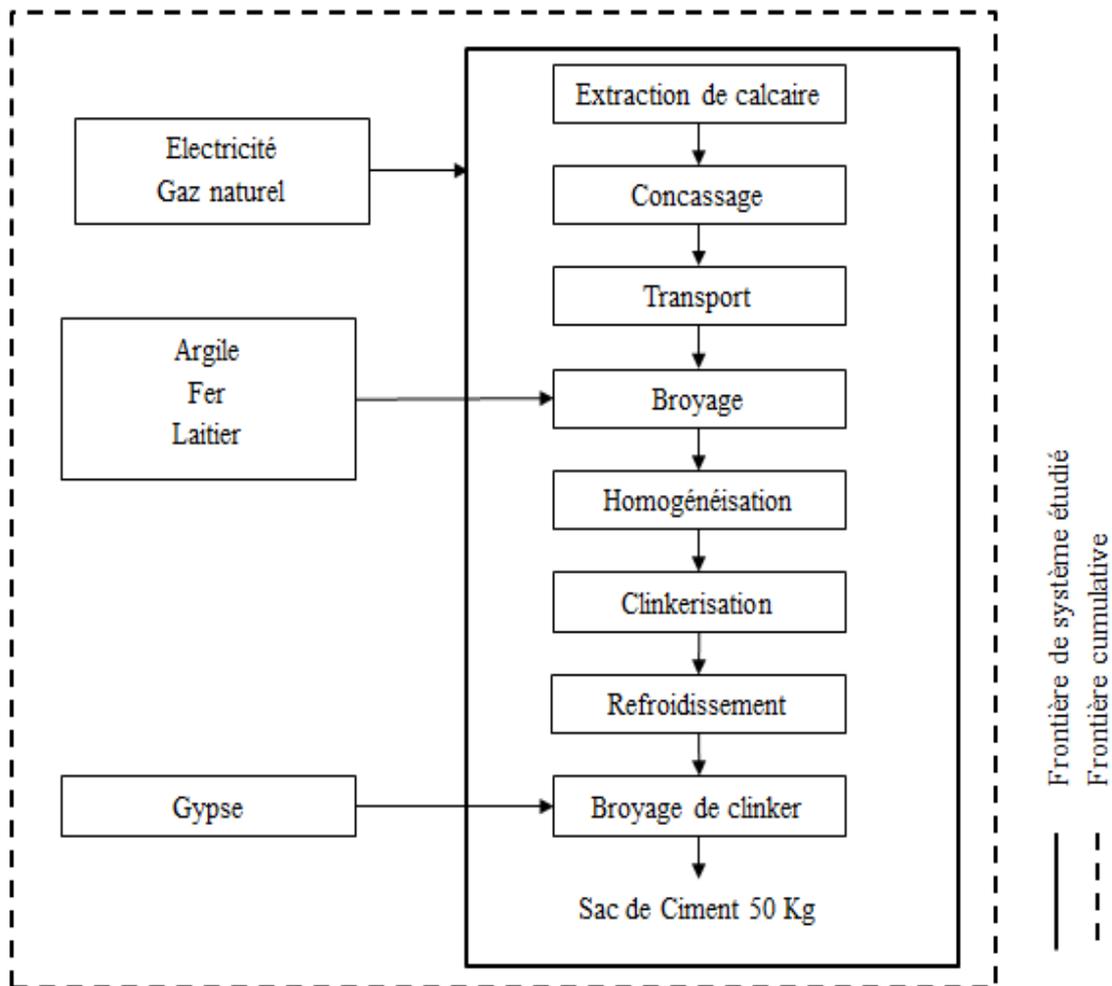


Figure. 09. Les frontières de système étudié

1.4. Fonction et Unité fonctionnelle

Mettre la définition de la fonction étudiée et les différentes caractéristiques de cette fonction, et aussi déterminer l'unité fonctionnelle.

« La fonction » est le service utile rendu par le produit ou le processus étudié (BLOG ACV), et la fonction étudiée est le ciment Portland qui est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière inorganique finement moulue qui, gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise par suite de réaction et processus d'hydratation et qui après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau (LAFARGE, 2009). L'unité fonctionnelle choisie pour cette étude est un sac de ciment de 50 kg.

2. Inventaire de Cycle de Vie (ICV) de ciment portland

Chapitre III : ACV de Ciment Portland

2.1. Qualité des données

L'Inventaire du Cycle de Vie (ICV) consiste à recenser l'ensemble des « flux élémentaires » échangés par le système avec l'environnement. Il s'agit ici de matière et d'énergie directement extraite ou émise dans l'environnement.

Les données utilisées dans cette recherche ont été récoltées suite à une analyse descriptive du processus de production.

Les données relative à la phase d'extraction de calcaire ainsi que les données de de la phase de production de ciment utilisées dans l'inventaire d'entrée sont des données primaires, elles ont été récoltées directement depuis les la direction d'exploitation de « SCHS ». Ces données sont relatives à l'année 2015.

Les données relative à l'extraction du gaz naturel utilisé comme combustible, la génération d'électricité, et les données d'entrée pour les processus auxiliaires, sont secondaires (nous avons fait recours à des données génériques récupérées de la base de données du logiciel GEMIS 4.7).

2.2. Description du procédé de production de ciment portland

2.2.1. Phase d'Extraction de matière première

a. Exploitation de calcaire

La pratique d'exploitation dans les conditions du gisement « Hdjar-Soud » est de haut en bas, les travaux d'extraction sont caractérisés par un avancement du chantier et des fronts du travail dans le temps et dans l'espace.

Dans la carrière Hdjar-Soud la méthode d'exploitation appliquée est de fonçage à un bord unique exploitable avec transport par camions.

b. Concassage de calcaire

Le calcaire abattu à l'explosif est chargé dans des camions, pour être transporté à la suite vers la station de concassage où il est fragmenté par un concasseur giratoire d'une capacité de 900 tonnes/heure. Le but de ce concasseur est de réduire la dimension des minéraux. Après le produit concassé est transporté à travers un crible, les non passant sont recyclés vers un concasseur à poisson d'une capacité de 350 tonnes/heure, les passants ou tamisât de granulométrie entre 0 mm à 250 mm

2.2.2. Phase de Transport

Chapitre III : ACV de Ciment Portland

Le calcaire concassé est acheminé vers l'usine au moyen d'un convoyeur à bande d'une longueur de 4 500 mètre avec un débit de 300 t/h. Au niveau de l'usine la matière concassée est déversée à l'aide d'un stocker dans deux halls de stockage couvert (ligne 1 et ligne 2) d'une capacité de 10 000 tonnes chacun.



Figure. 10. Transport de la matière première par convoyeur à bande

2.2.3. Phase de Production

Pour fabriquer du ciment, il faut réunir quelques éléments principaux selon des dosages préétablis. Il est obtenu par la cuisson d'un mélange composé généralement aux environs de 80% de calcaire (majoritairement composé de carbonate de calcium CaCO_3) et de 20% d'argile mélange complexe et souvent hydraté de silice (SiO_2), d'alumine (Al_2O_3), d'oxyde de fer (Fe_2O_3) et même souvent de la bauxite. Les cimenteries sont d'ailleurs implantées à proximité d'importants gisements de ces matières.

Il existe quatre méthodes de fabrication du ciment à savoir : la voie humide, semi humide, semi sèche, et sèche, ce dernier est communément utilisé à la cimenterie de Hdjar-Soud « SCHS ».

Les ciments usuels sont fabriqués à partir d'un mélange de calcaire (CaCO_3) environ de 80% et d'argile ($\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$) environ de 20%. Selon l'origine des matières premières, ce mélange peut être corrigé par apport de bauxite, oxyde de fer ou autres matériaux fournissant le complément d'alumine et de silice requis.

A- *Atelier de préparation du cru*

Chapitre III : ACV de Ciment Portland

L'utilisation du nombre des matières première dépend le plus souvent de leur composition chimique; autrement dit lorsqu'il y a manqué de silice ou d'oxyde dans l'argile, la correction se fait par les matières de correction.

Ainsi, celles utilisées à la cimenterie de Hadjar -Soud sont: le calcaire, l'argile, le sable et le minerai de fer dont les proportions sont données dans le tableau.5 [6]:

Tableau .5. Composition du cru de Hdjar-Soud

Matières premières	Calcaire	Argile	Sable	Minerai de fer
Quantités en % (environ)	75	20	3	2

i. Dosage et broyage de la matière première

Les deux matières premières principales; calcaire et argile et les deux matières de correction; minerai de fer et sable sont extraites de leurs trémies spécifiques de stockage à travers les doseurs qui sont pilotés et ajustés toutes les heures dans une salle de contrôle en fonction des résultats de l'analyse du cru à la sortie du broyeur à boulets. Dans le compartiment sécheur du broyeur, le mélange, arrivant avec une humidité < 6%, est séché par les gaz provenant de la tour à environ 300°C.

Lors du broyage la taille des particules de la matière première est très importante car elle est limitée à 0-5 % des particules plus grosses que 200 µm et 9-22 % plus grossiers que 70-90 µm. Le procédé de la cuisson est optimisé de la façon à consommer le moins d'énergie possible.

ii. Homogénéisation

Ultime étape avant la cuisson, l'homogénéisation, par un brassage intime, confère à la matière crue une composition chimique stable. De cette stabilité dépend la régularité des propriétés du clinker.

Elle se fait généralement dans deux silos d'homogénéisation en béton. La base de chaque silo est constituée de plusieurs secteurs formés d'une surface poreuse à travers laquelle de l'air comprimé est soufflé alternativement dans chacun des secteurs permettant l'homogénéisation de la couche extraite et le lissage des écarts de composition de l'alimentation.

B- Atelier de cuisson

La cuisson revêt une importance particulière dans la fabrication du ciment; c'est au

Chapitre III : ACV de Ciment Portland

cours de la cuisson que s'effectuent les transformations chimiques essentielles; c'est elle qui détermine, en grande partie la qualité du produit fini, et il n'est pas toujours facile de remédier aux défauts de la cuisson; elle participe, à raison de 40 à 60% aux coûts de la production du ciment.

Elle a pour but d'assurer un produit de cuisson et un débit prévu, le respect d'une limite fixée au prix de revient de la production, la limitation de l'usure de l'installation et de la consommation de l'énergie. Elle s'effectue dans les compartiments suivants :

i. Tour échangeur

Une opération de préchauffage commence par l'évaporation de l'eau que le mélange cru contient et se poursuit par la décarbonatation partielle. Le préchauffage se fait dans une série de cyclones, disposés verticalement sur plusieurs étages, appelée " préchauffeur " ; il y en a quatre à Hdjar-Soud. La matière froide, introduite dans la partie supérieure, se réchauffe au contact des gaz chaud provenant du four. D'étage en étage, elle arrive partiellement décarbonatée, jusqu'à l'étage inférieur, à la température d'environ 800°C.

Une précalcination se fait dans une boîte à fumée placée entre le préchauffeur et le four. La décarbonatation commencée dans le préchauffeur se fait pour l'essentiel dans le précalcinateur et se termine dans le four. Cette opération, qui s'effectue à des températures entre 650 et 900°, permet de libérer le gaz carbonique pour obtenir la chaux vive nécessaire à la fabrication de clinker.

ii. Four rotatif

Il est en acier (avec revêtement intérieur réfractaire) de 50 à 90 m de long, de 4 à 5 m de diamètre, légèrement incliné (environ 3°) et tournant de 1 à 3 tours/minute. À Hadjar Soud, le four à 70 m de longueur, 4,5 m de diamètre et tourne à une vitesse maxi de 2 tours/minutes.

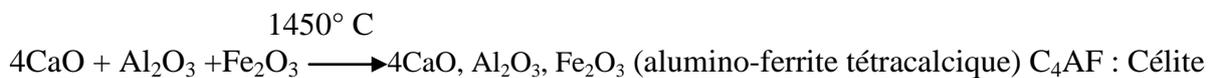
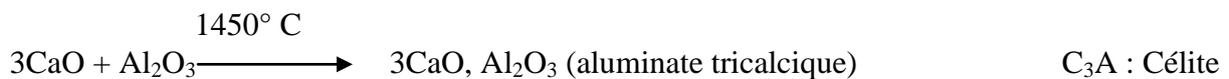
De l'entrée à la sortie du four, la matière passe par 05 zones caractérisées par les différentes températures.

- De 800 à 900° C: Zone de décarbonatation partielle (1) $\text{CaCO}_3 \longrightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$
- De 900 à 1200° C: Zone de décarbonatation totale (2) $\text{CaCO}_3 \longrightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$
- De 1250 à 1280°: Zone de transition : Phase liquide par l'alumine, le fer avec la chaux (Aptitude au croûtage).
- De 1300 à 1450°: Zone de cuisson: Toute la chaux se combine avec la silice pour donner les silicates bicalcique et tricalcique, ce sont les éléments principaux du ciment.

Chapitre III : ACV de Ciment Portland

- De 1250°: Zone de sortie (Refroidissement).

Sous l'effet de la chaleur, les constituants de l'argile (silicates d'alumine et d'oxyde de fer), se combinent avec la chaux provenant du calcaire pour donner des silicates et aluminates de chaux selon les réactions suivantes à des températures spécifiques (Voir Figure 11).



Ces réactions s'accompagnent d'un dégagement de chaleur (Exothermique) qu'on évalue environ à 110 Kcal de clinker [12].

iii. Refroidisseur du clinker

Il existe différent type de refroidisseurs comme à grilles, ballonnets, rotatifs. Dans le cas des ciments gris, le clinker est refroidi dans la majorité des cimenteries actuelles, de même qu'à Hdjar-Soud par des refroidisseurs à grilles, la manière de refroidissement est la suivante :

- le clinker va avancer à l'intérieur du refroidisseur grâce à coups répétés des grilles sur lesquelles ce dernier repose ;
- au travers des grilles, de puissants ventilateurs vont souffler sous le clinker pour le refroidir à environ 100°C (cette opération s'appelle la trempe) ;
- au début ou à la fin du refroidisseur (cela dépend du modèle utilisé), un concasseur à un ou plusieurs rouleaux va broyer de manière grossière le clinker; à Hdjar-Soud ce sont des concasseurs à marteaux et à cylindres.

Dans le cas du ciment blanc, plus fragile que le gris car il doit rester sans taches, un refroidisseur rotatif est inséré entre le four rotatif et le refroidisseur à grilles. C'est un cylindre un peu incliné qui tourne sur lui-même à l'intérieur duquel de l'eau est pulvérisée avec multiples buses. Le clinker est donc prêt pour le stockage dans des silos où il sera utilisé avec des ajouts pour le broyage.

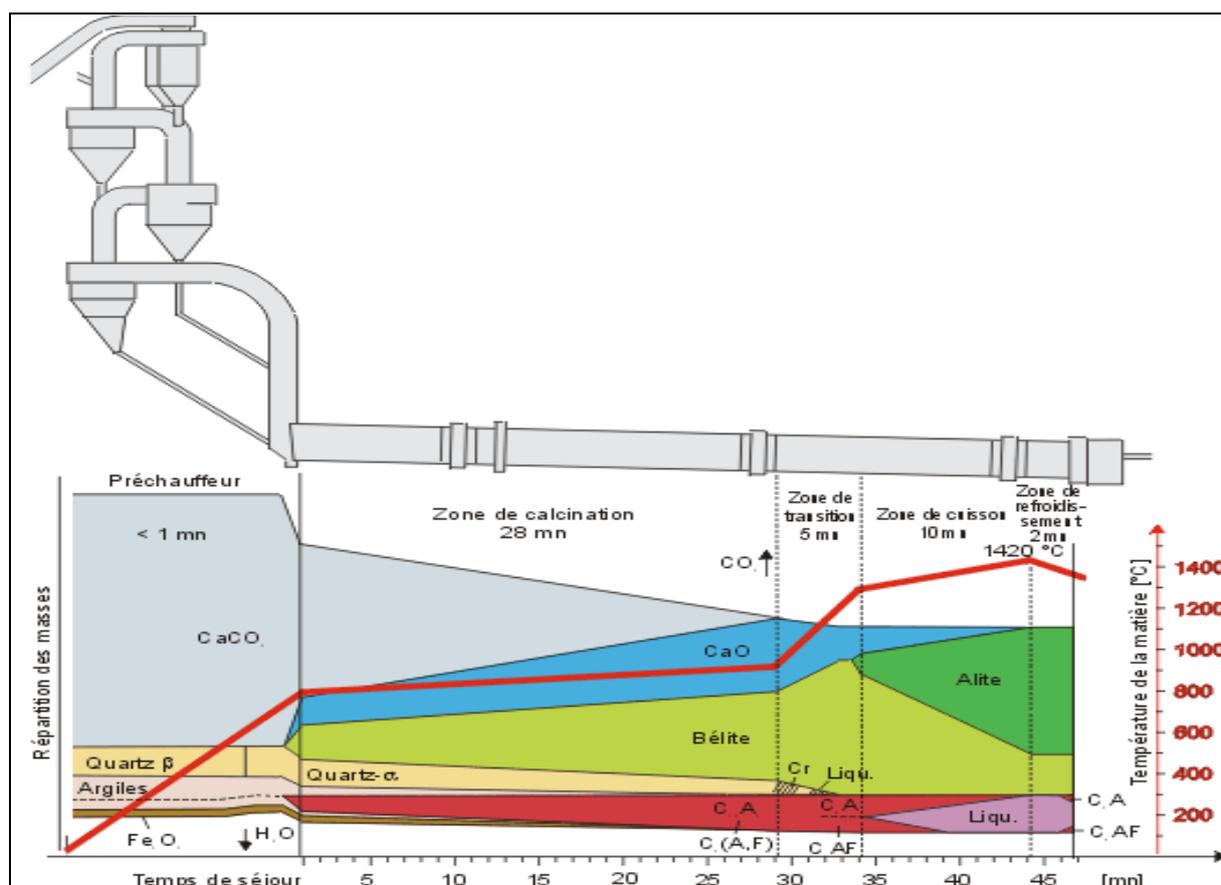


Figure.11. Principales zones de réactions dans le four et leurs résultats

C- Broyage du ciment

Le clinker produit est broyé avec du gypse (3 à 5 %), indispensable à la régulation de prise du ciment, cette opération est généralement effectuée au moyen d'un broyeur à boulet, dispositif cylindrique de 8 à 12m de long de 2 à 4m de diamètre munis intérieurement de boulets de 20 à 90mm en acier, mis en rotation dans lequel on introduit le clinker, de manière à obtenir le ciment Portland.

À Hdjar-Soud les broyeurs sont constitués de deux compartiments dont le premier comporte des boulets de diamètres compris entre 50-90 mm et le second de 20 à 50mm avec un débit de 120t/h.

Les ciments à ajouts sont obtenus par l'addition lors de la phase de broyage d'éléments minéraux supplémentaires contenus dans des matériaux qui sont déjà cités, dont celui utilisé à Hdjar-Soud est le laitier de hauts fourneaux (18%) lors du broyage du ciment. Il est ensuite broyé très finement (grains inférieurs à 40 microns).

Le broyage (Figure.12) constitue, avec le processus de cuisson, l'un des plus importants éléments du coût de fabrication. On utilise par suite très fréquemment des adjuvants du

Chapitre III : ACV de Ciment Portland

broyage qui permettent de réduire les frais et d'améliorer le degré de finesse et potentialiser les résistances. Après cette opération, le ciment est stocké dans des silos avant l'expédition.

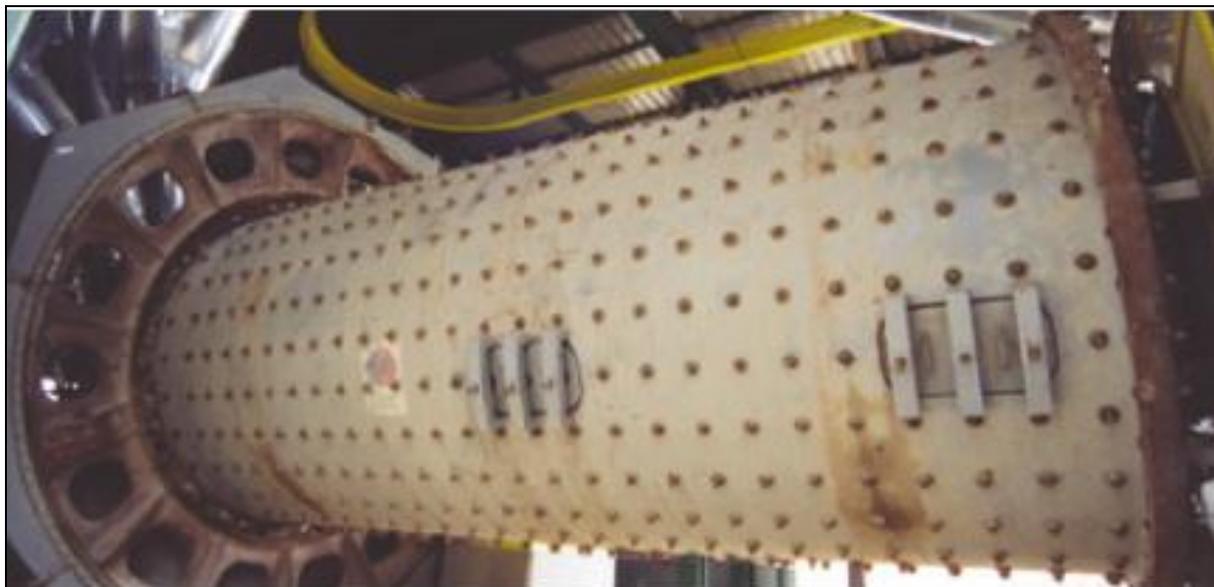


Figure. 12. Broyeur à boulets pour le ciment

D- Expédition du ciment

Une fois le processus de fabrication est terminé, le ciment est stocké dans des silos où il subira un contrôle avant 48 heures, puis ensaché dans des sacs de 50 kg à destination du commerce ou livré aux utilisateurs en vrac, dans des véhicules spéciaux. Le mode de transport dépend à la fois de l'emplacement de la cimenterie et de celui du destinataire; suivant les cas, on recourra au rail, à la route ou à la voie d'eau.

2.3. Bilan quantitatif et qualité des entrées

La cimenterie « SCHS » est dotée de deux lignes de production, d'une capacité de production annuelle de un (01) million de tonne de ciment tous types confondus. La quantité de ciment portland produite par l'entreprise à l'année 2015 est de 350×10^3 T. Les quantités totales des entrées (matières premières+ énergie) consommées durant l'année en question, ainsi que les quantités relatives à la production d'un sac de ciment (unité fonctionnelle) sont représentées dans le tableau 2 ci-dessous :

Tableau.6. Bilan d'entrée pour la production d'un « Sac de ciment » (50kg)

Consommation	Unité	Quantité annuelle	Quantité par UF
Electricité	MJ	$7,56 \times 10^6$	21,6
Gaz naturel	L	$60,158 \times 10^6$	171,88
Calcaire	T	$60,159 \times 10^6$	39

Chapitre III : ACV de Ciment Portland

Fer	$0,175 \times 10^6$	0,5
Sable	$0,525 \times 10^6$	1,5
Argile	$3,64 \times 10^6$	10,4

3. l'évaluation des impacts liés à la production de ciment

L'industrie de ciment tient une place importante dans le domaine de construction ; elle comprend de nombreux services qui conçoivent, fabriquent et commercialisent le ciment de toutes types, en vrac ou en sac, elle engendre pour cela des rejets de différentes formes : Solides, Gazeuses, ...etc.

Ces rejets contiennent des résidus de produits néfastes dès qu'ils sont en contact avec le milieu naturel. Leur quantité est de l'ordre de g/l dans le milieu naturel sont suffisante pour engendrer des effets adverses globaux ou spécifiques au niveau cellulaire ou moléculaire dans les trois compartiments : (sol, air et eau). Chaque résidu a un comportement spécifique dans le milieu naturel et contribue d'une façon unique dans une catégorie d'impact donnée. La contribution de chaque résidu est difficile à déterminer par les méthodes d'évaluation classique, cela revient aux limites de ces méthodes dans le temps ou dans l'espace.

La méthode d'évaluation environnementale par analyse de cycle de vie de produit est une méthode à prendre en considération lors de l'évaluation du cycle de vie de tous les procédés amonts utilisés pour fournir le produit, ainsi que tous les intrants au procédé de production objet d'étude, que soit direct ou indirect.

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

Pour l'évaluation des impacts liés à l'industrie cimentaire en Algérie, on fait recours à l'outil informatique GEMIS 4.7 qui est doté d'une base de données ACV de produits, qui est principalement utilisé pour l'analyse des performances environnementales et l'utilisation de l'énergie. Deux catégories d'indicateurs d'impacts environnementaux sont distinguées dans notre étude : les indicateurs «Ressources» caractérisent les consommations réelles de ressources (matière première et énergie) qu'engendre le produit sur l'ensemble de son cycle

Chapitre III : ACV de Ciment Portland

de vie ; les indicateurs «Impacts» caractérisent les pollutions réelles et/ou potentielles générées par le produit sur l'ensemble de son cycle de vie.

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

- Potentiel de réchauffement climatique ;
- Exploitation des ressources naturelles primaires.

3.1. Méthode de travail

GEMIS 4.7 est subdivisé en trois principaux axes (listes), produits, processus, et scénarios. La liste des produits est réservée pour exprimer les données générales et les métas données de produit lui-même, son poids spécifique, son PCI dans le cas échéant, ses propriétés chimiques, et physicochimiques, ...etc.

La liste des processus donne le détail de la chaîne des procédés liés directement ou indirectement au produit, la liaison des différents procédés est donnée graphiquement sous forme d'un arbre des procédés de produit. (La **figure13**) ci-dessous montre un exemple de procédé de production de ciment.

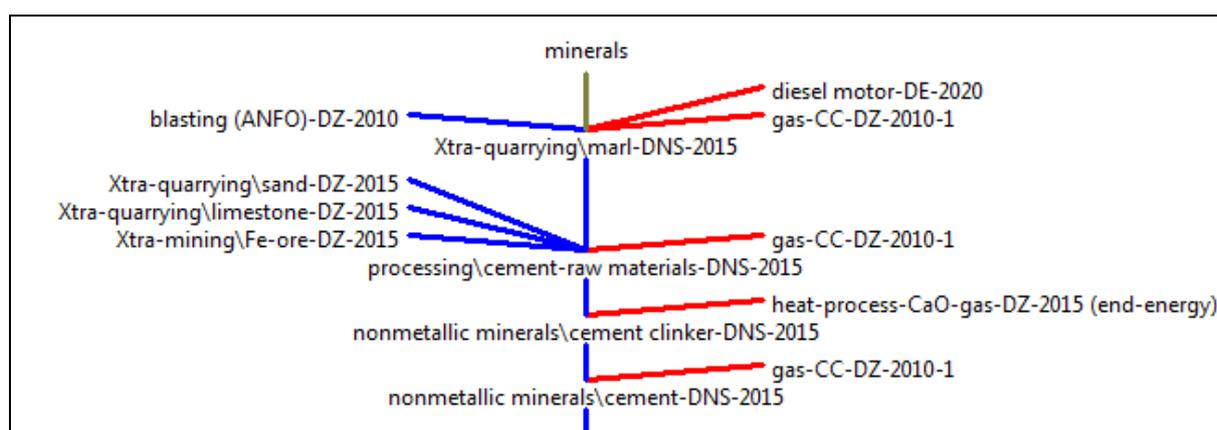


Figure.13. Présentation graphique de l'arbre de procédé de production de ciment portland

La liste des scénarios quant à elle, donne une présentation des produits classés selon leurs groupes d'industrie ou selon leurs natures. Dans la liste des scénarios, on peut effectuer l'évaluation d'impact graphique ou numérique, la comparaison des résultats en cas de

Chapitre III : ACV de Ciment Portland

comparaison entre deux scénarios, ou calculer la contribution du produit dans son groupe de production.

3.2. Démarche d'évaluation d'impact

Lors de l'évaluation d'impact, les données de sortie sont affectées directement à l'unité fonctionnelle déterminée auparavant. Dans le cas de production de ciment, GEMIS 4.7 prend en compte la fraction d'impact liée aux processus amont comme l'extraction et le transport d'argile. Bien que l'impact de production de ciment soit calculé à base d'une unité qui pèse 4,4kg, et que la quantité d'argile utilisée dans la production de ciment est beaucoup plus qu'un kilogramme. GEMIS 4.7 calcul l'impact lié à la quantité d'argile utilisée dans le procédé de production de ciment et l'additionne au bilan d'impact global.

Pendant la phase d'évaluation d'impact lors d'une d'ACV, GEMIS 4.7 peut accomplir les étapes de choix de catégories d'impact, la classification, et la caractérisation automatiquement et d'une façon autonome. Dans le cas où une substance peut avoir des impacts multiples, deux modes différents sont considérés par GEMIS :

- En parallèle : Une substance a deux impacts simultanés par exemple le NO_x qui contribuent dans l'acidification et la formation d'ozone troposphérique, ou le CH₄ qui contribue lui aussi dans la formation d'ozone troposphérique et le réchauffement climatique.
- En série : Une substance a un résultat nuisible qui devient la cause d'un autre problème. Par exemple, le SO₂ provoque une acidification, ce qui provoque une mobilisation de certains métaux, avec des effets négatifs sur l'écosystème et la santé humaine.

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

4. Interprétation des résultats

4.1. Réchauffement climatique

La production d'un sac de ciment portland (UF) provoque l'émission des GES, la quantité des gaz émis lors de sa production s'élève à 43,87Kg/UF. Les principaux GES sont le Dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄) et le Protoxyde d'azote (N₂O). Le CO₂ est le principal gaz émis par 98,1%, le reste est pour le CH₄ et N₂O par 1,4% et 0,5% respectivement.

Chapitre III : ACV de Ciment Portland

Tableau.7. Bilan total de carbone et contribution des principaux GES

	Quantité	Facteur	Part (%)	Equivalence
CO ₂	43,04	1	98,1	43,04
CH ₄	0,024	25	1,4	0,61
N ₂ O	0,72x10 ⁻³	298	0,5	0,21
Perfluorométhane	221,25x10 ⁻⁹	7390	3,72x10 ⁻³	1,63x10 ⁻³
Perfluoraéthane	22,218x10 ⁻⁹	12200	0,617x10 ⁻³	0,27x10 ⁻³
Somme			100	43,87

La quantité de CO₂ émise lors de la production d'une UF de Ciment portland est 43,04kg. L'opération de clinkérisation est la source principale d'émission de CO₂ par 36,87kg (85,67%), dont 27,25kg (63,31%) est due à la transformation de CaCO₃ en CaO (Clinkérisation proprement appelée), et 9,62kg (22,36%) est due à la combustion de gaz naturel pour produire de la chaleur. Les autres sources d'émission sont : la génération d'électricité par 4,85kg (11,27%), le concassage de calcaire et le broyage d'argile utilisés comme matières premières par 0,768kg (1,78%).

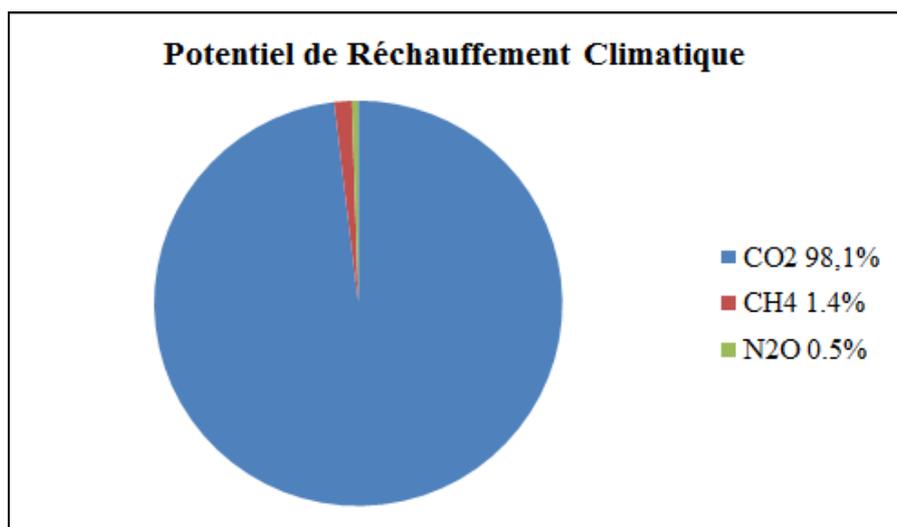


Figure.14. Principaux facteurs d'émission qui contribuent dans le Réchauffement Climatique

La quantité émise de CH₄ est 24x10⁻³kg/UF, les principales sources d'émission sont : l'extraction et le traitement de gaz par 23,5x10⁻³kg (94,18%), la combustion de gaz pour la clinkérisation par 0,42x10⁻³kg (1,72%), et la génération d'électricité par 0,37x10⁻³kg (1,48%), et enfin, le transport de gaz par 0,31 x10⁻³kg (1,26%). L'émission de N₂O est négligeable par rapport au bilan carbone total (N₂O ne représente que 0,5% du bilan).

4.2. Potentiel d'Acidification

La production d'une UF de ciment portland provoque l'acidification de l'atmosphère à la

Chapitre III : ACV de Ciment Portland

hauteur de 0,03 kg SO₂ eq. Les principaux gaz sont le NO_x et le SO₂ par 98,32% et 1,64% respectivement.

Tableau.8. Bilan d'émission pour l'acidification

[kg]	Quantité	Facteur	Part (%)	Equivalence
NO _x	42,9x10 ⁻³	0,696	98,32	29,9x10 ⁻³
SO ₂	0,5x10 ⁻³	1	1,64	0,5x10 ⁻³
NH ₃	4,14x10 ⁻⁶	1,88	0,025	7,75x10 ⁻⁶
HCl	80,2x10 ⁻⁶	0,878	0,002	70x10 ⁻⁶
HF	10,9x10 ⁻⁶	1,6	0,57x10 ⁻³	17,4x10 ⁻⁶
H ₂ S	4,25x10 ⁻⁹	1,88	0,026	7,95x10 ⁻⁹
Somme			100	30,4x10 ⁻³

La quantité totale des NO_x émise est 0,042 kg, les principales sources d'émission des NO_x sont : la génération d'électricité par 43,13%, le concassage des matières premières (calcaire et argile) par 25,20%, la clinkérisation par 24,85%, le transport de gaz naturel par 4,08%, et enfin l'abatage pour l'extraction de calcaire par 1,01%.

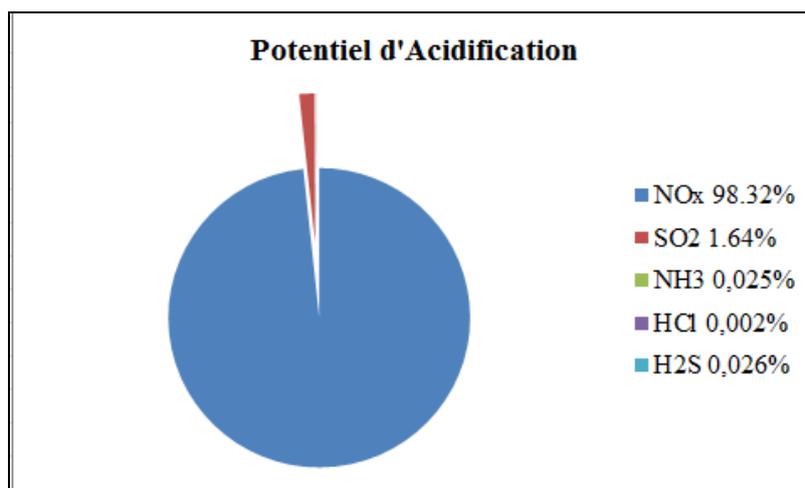


Figure. 15. Principaux facteurs d'émission dans la catégorie d'impact d'acidification

L'émission de SO₂ est de l'ordre de 0,5x10⁻³kg. Les principales sources d'émission sont : le transport de gaz naturel par 67,11%, la génération d'électricité par 23,19%, le concassage de minerai par 06,32%, et le raffinage des huiles industriels par 03,15%.

4.3. Potentiel Précurseur d'Ozone Troposphérique (PPOT)

Le potentiel de formation d'ozone troposphérique est à l'ordre de 0,168kg COVNM eq/UF. Les principaux sont le monoxyde de carbone (CO) par 68,05%, les NO_x par 31,12%, le CH₄ par 0,2% et les COVNM par 0,61%.

Chapitre III : ACV de Ciment Portland

Tableau .9. Bilan d'émission pour la formation d'ozone troposphérique (PPOT)

[kg]	Quantité	Facteur	Part (%)	Equivalence
CO	1,04	0,11	68,05	0,114
NO _x	0,042	1,22	31,12	0,052
CH ₄	0,025	0,014	0,20	0,345x10 ⁻³
COVNM	1,03x10 ⁻³	1	0,61	1,00x10 ⁻³
Somme			100	0,168

La quantité de CO est égale à 1,04 kg. Les principales sources d'émission sont : la clinkérisation par 89,18%, la génération d'électricité par 9,61%, et le concassage des matières premières par 1,1%.

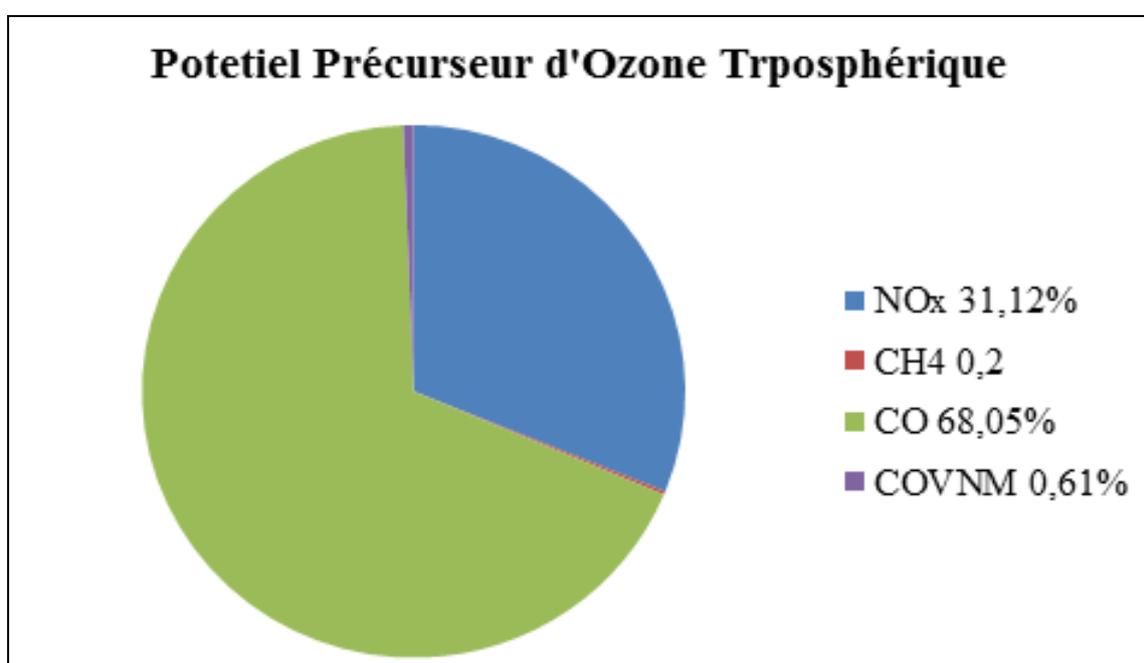


Figure. 16. Principaux facteurs d'émission dans la catégorie d'impact PPOT

La quantité des COVNM émise lors de la production du ciment portland est 1,03x10⁻³ kg. Les principales sources d'émission sont : la clinkérisation par 41,84%, la génération d'électricité par 36,02%, le raffinage des huiles industrielles par 15,54%, et enfin le concassage des matières premières par 06,33%.

Chapitre III : ACV de Ciment Portland

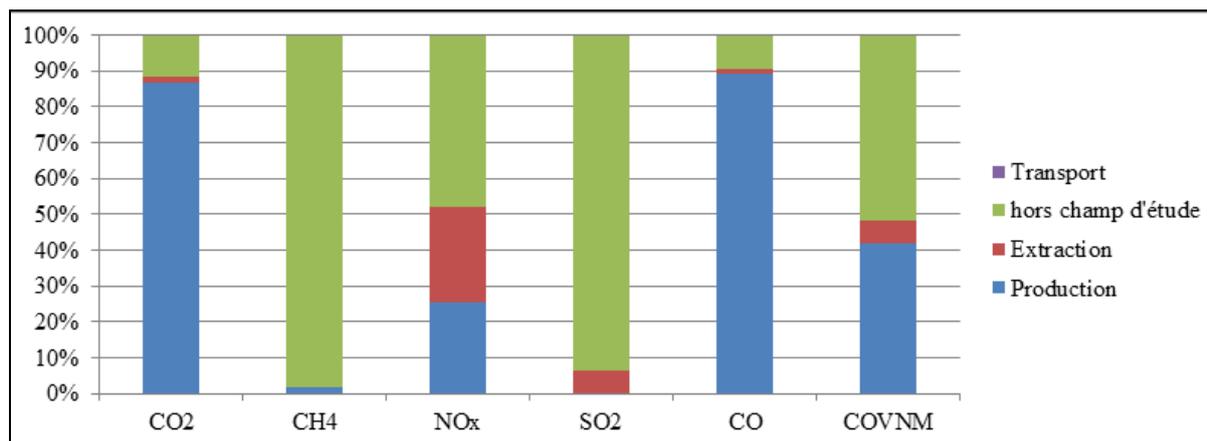


Figure. 17. Contribution des principales substances dans les différentes phases de Ciment Portland

4.4. Consommation d'Énergie Cumulée

La production d'un sac de ciment portland nécessite la consommation d'une quantité cumulée d'énergie fossile égale à 281 MJ, dont la quantité de gaz nature est majoritaire par 95,01% (267 MJ), le reste est le pétrole par 4,55% (12,38 MJ).

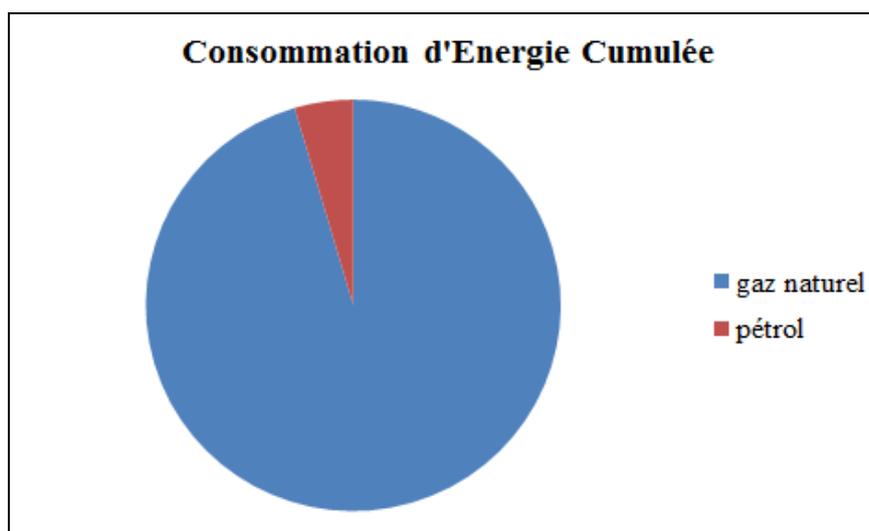


Figure. 18. Contribution des principaux carburants utilisés pour la production d'une UF de Ciment Portland

Conclusion générale

L'industrie cimentaire occupe une place primordiale dans le développement économique et social local. Ce travail donne une vue plus précise sur le secteur de production du ciment en Algérie d'une manière générale, et sur les procédés de production utilisés dans les cimenteries du secteur publique d'une manière plus précise. Ce travail a été réalisé pour enrichir les connaissances techniques disponibles sur l'industrie cimentaire en Algérie présentées dans la « Société Cimentaire Hdjar-Soud » (SCHS) qu'elle fait l'objet de cette étude.

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

A l'issue de cette étude, il ressort que le cycle de vie du « Ciment Portland » est caractérisé par sa grande consommation des énergies fossiles (gaz naturel), et son émission des GES. Le dioxyde de carbone (CO_2) est le principal gaz à effet de serre émis.

La phase de production (objet de l'étude) est la principale source d'émission des GES par 36,87 kg CO_2/UF , l'opération de clinkérisation semble être l'opération qui a le plus d'impact. La génération d'électricité nécessaire à faire fonctionner les machines dans le système d'étude est une autre cause principale d'émission des GES. Le concassage des roches et le broyage de l'argile dans la phase d'extraction ne semble pas avoir un impact significatif.

La production d'un sac de ciment portland de 50kg nécessite l'utilisation de 0,281GJ (9,48 Nm^3) de gaz naturel.

Recommandation

A la fin de cette étude, il est important de mentionner que la production du ciment est une activité industrielle caractérisée par sa grande consommation des hydrocarbures (gaz naturel principalement). Cette consommation non rationnelle de gaz naturel, provoque l'émission des quantités considérables des GES (dioxyde de carbone). La principale cause de la surconsommation de CH_4 peut être expliquée par l'état de l'installation (opération depuis plus de 35 ans). Le mauvais état des l'installation et les pannes fréquentes rendent le rendement du procédé très faible. Pour cette raison, une mise à niveau de l'installation et un audit

Conclusion générale

environnemental sont indispensables et urgents. Ces mesures vont permettre de : réduire la facture de consommation de CH₄, baisser le bilan d'émission de carbone dans le procédé, et assurer un meilleur suivi de l'état de l'environnement.

Nous espérons au terme de ce travail avoir contribué à la connaissance et à la maîtrise de la l'industrie cimentaire en Algérie par l'intermédiaire de L'analyse de cycle de vie qui demeure un outil incontournable surtout en y joignant des logiciels récents et qui ont donnés de bons résultats.

Annexe A : Géologie

1. Géologie de la région

1.1. Lithostratigraphie

La région d'étude est constituée par des schistes du paléozoïque et par des roches du mésozoïque carbonatées et siliceuses ; elles sont caractérisées par des dolomies, calcaires massifs et marno-calcaires, calcaires schisteux, grés et conglomérats (tableau A.1).

1.2. Structure géologique de la région

La région de Djebel Safia fait partie d'une structure synclinale qui est limitée à l'est par la plaine quaternaire de L'Oued El Kébir ; à l'Ouest cette structure s'ennoie sous les reliefs numidiens, au Nord-Ouest elle se prolonge au massif de Filifila et au Sud elle est limitée par la dépression d'Azzaba, Ain Charchar, Gastu et dorsale Kabyle (chaîne numidienne) [6].

2. Étude géologique du gisement

2.1. Géologie du gisement

Le Djebel Safia est constitué par des formations géologiques plissées du Jurassique et Crétacé qui sont affectées par un bombement anticlinal. Elles se distinguent comme suit :

a) Jurassique

❖ Lias inférieur

Il est constitué par des dolomies qui affleurent à partir de la côte 240 m vers le bas du Djebel Safia et constituent une bande longue de 2 km et large de 50 à 200 m. Leur épaisseur est approximativement de 60 à 80 m. Les dolomies de couleur grise à nuance brunes ou jaunâtres sont compactes et d'un aspect massif à grains fins. Le contact entre les dolomies et les calcaires massifs du lias moyen et franchement tranché.

❖ Lias inférieur moyen inférieur

L'essentiel de cette formation est constitué par une séquence de calcaires cristallins massifs dans stratification manifeste. Sa puissance est de 100 m à l'extrémité Sud-Est et plus de 200 m sur le versant Nord- Ouest. Dans les assises inférieures, les calcaires sont de couleur claire presque rose ou jaunâtre et compactes mais fortes diaclases. Vers le haut, ces calcaires passent progressivement à une couleur gris-bleuâtre moins fracturés avec une structure oolithique et graveleuse. La porosité des calcaires est faible et leur poids volumique est de 2,65 T/M³.

Annexes

❖ Marno-calcaires siliceux jurassique

Cette formation affleure d'une manière discontinue sur le flanc nord-est Djebel Safia ; ces marno-calcaires sont localement un peu gréseux noduleux et à amygdales de silex.

Calcaires à silex (puissance 14 m) et calcaires argileux, siliceux (puissance 15 m).

b) Crétacé

❖ Néocomien et Barrémien

Cette série est constituée par des calcaires roux ou bleuâtres qui s'enrichissent progressivement en dépôts argileux. Ces marnes sont schisteuses et lustrées, mais le métamorphisme dynamique est à peine sensible ; aucune recristallisation de minéraux phyllitiques ne se manifeste franchement.

- Calcaires marneux (puissance 200 m)
- Marnes (puissance 100 m)

❖ Flysch-Sénonien et Cénomanién

Cette série de 20 m de puissance est caractérisée par des phtanites à radiolaires du Cénomanién ainsi que des pélites calcaireuses, des brèches d'inocéramus et à globotruncana du Sénonien.

La couverture est représentée par la couche végétale et les blocs de calcaires de puissance variant de 0 à 0,30 m [5].

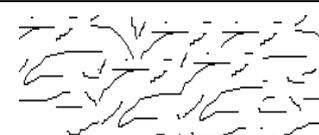
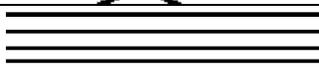
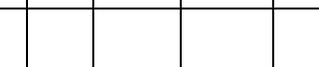
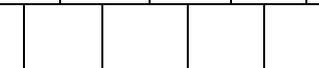
2.2. Structure géologique

Le gisement de calcaire de Djebel Safia est constitué par un anticlinal complexe résultant de deux plis anticlinaux simples.

La série entière du Djebel Safia est fortement étirée et a subi un très léger métamorphisme dont témoigne l'aspect schisteux et lustré des calcaires argileux néocomiens. Encore plus au nord ce métamorphisme est davantage manifeste, ce dont témoignent les marbres et les cipolins à épidote. La tectonique a cependant causé une fissuration intense [6].

Annexes

Tableau A.1. Coupe stratigraphique de la carrière de Hadjar-Soud

Ere	Système	Coupe	Lithologie
Quaternaire	Alluvions		Argile sableuse avec les cailloux de calcaire
Mésozoïque	Crétacé supérieur		Crès et schistes
			
			
	Crétacé inférieur		Marne, calcaire et marne
	Jurassique		Marne calcaire
			Calcaire à silex
			
Jurassique Inférieur (Lias)		Calcaire	
		Dolomie	
			
			

Annexe B : Méthodes d'exploitation

1. Méthodes d'exploitation utilisées

1.1. Généralités

Une méthode d'exploitation est une succession de réalisation des travaux d'enlèvement des stériles et du minerai dans un ordre bien déterminé d'autre termes, un système d'exploitation caractérise le développement des travaux préparatoires, de découverte et d'extraction, dans le temps et dans l'espace.

Les travaux de découverte et d'extraction se caractérisent par l'avancement des chantiers et des fronts de travail dans l'espace et le temps ainsi que le type et paramètres des engins utilisés.

La préparation des roches à extraction par travaux de forage et de tir doit répondre aux exigences suivantes :

- Degré nécessaire et régularité de la fragmentation des roches ;
- État normal du pied du gradin ;
- Formation du tas de la masse minière ;
- Action séismique minimale ;
- Dépenses minimales et grande sécurité.

Le caractère de déplacement des chantiers et des fronts de travail définit le système de chargement et de transport de la masse minière, c'est-à-dire la structure de la mécanisation complexe des travaux miniers.

En générales, on distingue les méthodes d'exploitation suivantes :

- Méthodes d'exploitation sans transport ;
- Méthodes d'exploitation avec engin de transport ;
- Méthodes d'exploitation avec transport des déblais ;
- Méthodes d'exploitation combinées.

La pratique d'exploitation dans les conditions du gisement Hadjar Soud est de haut en bas, les travaux d'extraction sont caractérisés par un avancement du chantier et des fronts du travail dans le temps et dans l'espace.

1.2. Choix de la méthode d'exploitation

Annexes

La méthode d'exploitation doit tenir compte de la relation étroite qui existe entre les différents facteurs suivants :

- Caractéristiques géologiques du gisement ;
- Dimensions du gite ;
- Puissance du stérile ;
- Propriétés physico-mécaniques du minerai et du stérile ;
- Production planifiée de la mine ;
- Mode d'ouverture du gisement ;
- Nombre d'engins miniers prévus.

A la base de l'interdépendance de ces facteurs, les chercheurs les plus réputés du domaine ont procédé à des classifications des méthodes d'exploitations. Parmi ces classifications, on retient, celles du célèbre académicien Ruse RJEVSKY. V et de professeur SCHESCHKO E.

D'après E. SCHESCHKO, l'indice principal utilisé dans cette classification est la direction du déplacement des stériles à l'intérieur de la mine à ciel ouvert (carrière).

D'après cette classification, on distingue trois groupes de méthodes à savoir :

Groupe A : on y retrouve toutes les méthodes d'exploitation avec le déplacement des stériles à travers la carrière ou mines à ciel ouvert.

Groupe B : il comporte les méthodes d'exploitation avec le déplacement des stériles en direction de la carrière.

Groupe C : ce sont des méthodes avec le déplacement mixte des stériles.

La classification de RJEVSKY. V est basé sur les indices suivants :

- L'angle de pendage du gite ;
- La disposition des fronts de travail dans le plan ;
- Le nombre de bords exploitables de la mine (carrière) ;
- La direction de progression des travaux ;
- La disposition des terrils par rapport au contour du champ minier.

Suivant l'indice relatif à l'angle de pendage des gites, RJEVSKY. V a divisé toutes les méthodes d'exploitations en deux groupes :

- Méthode d'exploitations continues : elles sont destinées pour les gisements

Annexes

horizontaux et peu inclinés.

- Méthodes d'exploitations de fonçage : elles sont destinées pour les gisements inclinés et les gites dressant.

Dans la carrière Hadjar -Soud la méthode d'exploitation appliquée est de fonçage à un bord unique exploitable avec transport par camions.

1.3. Détermination des paramètres de la méthode d'exploitation appliquée

1.3.1. Hauteur des gradins

Lors de la détermination de la hauteur des gradins, il faut tenir compte de plusieurs facteurs dont : la sécurité des travaux miniers, la productivité de la carrière ou mine à ciel ouvert, la qualité des minéraux, les caractéristiques du gisement, le mode d'extraction, les moyens de la production, le volume des travaux capitaux...etc.

Dans les conditions actuelles de la carrière de Hadjar Soud, la hauteur du gradin adoptée est :

- ✓ Niveau 1: $H_g = 13$ m.
- ✓ Niveau 2 : $H_g = 12$ m.
- ✓ Niveau 3 : $H_g = 14$ m.

1.3.2. Angle du talus des gradins

L'angle du talus des gradins est pris en fonction de la nature et de la dureté des roches. A la carrière de Hdjar- Soud la roche de calcaire a une dureté de 7.

Le tableau, illustre les données de l'angle du talus des gradins selon le coefficient de dureté des roches.

Tableau B.1. Angle du talus du gradin selon la dureté des roches

Coefficient de dureté	Angle d'éboulement des roches (°)	Angles du talus des gradins(°)
6 ÷ 8	65°	85°

Dans la condition actuelle de la carrière de Hadjar Soud l'angle de talus des gradins est 85°.

1.3.3. Largeur d'enlevure

Pour la détermination de la largeur d'enlevure on prend en considération :

- Les propriétés des roches
- Le mode d'abattage des roches

- Le type et dimensions des engins de chargement.

La largeur d'enlèvement : $A = 6,28$ m

1.3.4. Largeur de la plateforme de travail

La largeur de la plateforme de travail est déterminée en fonction des propriétés physiques et mécaniques de roches. Des dimensions du tas des roches abattues et des paramètres techniques des engins de chargement et de transport.

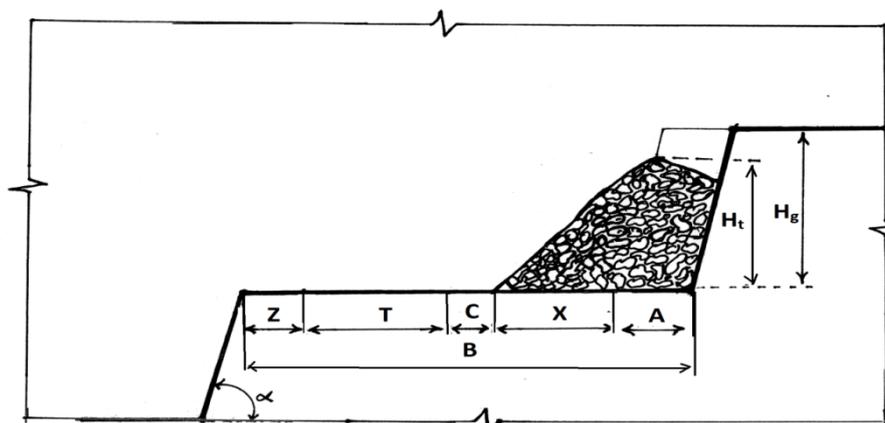


Figure B.1. Paramètres d'une plate-forme de travail lors de l'abattage à l'explosif.

La largeur de la plate-forme de travail : $B = 44,78$ m

1.3.5. Vitesse d'avancement des travaux miniers

La vitesse d'avancement dépend de la largeur d'enlèvement et du rendement de l'engin de chargement. $V_{ch} = 14,54$ m

1.3.6. Approfondissement des travaux miniers annuels

La vitesse d'avancement annuelle du front de travail de la carrière est défini d'après le rendement annuel des équipements de chargement. $V_f = 5,36$ m

1.4. Exploitation des matières premières

1.4.1. Calcaire

Le gisement de calcaire de Hdjar- Soud se situe à relief montagneux avec un angle de pendage de 40° à 80° . Le gisement de calcaire de Djebel Safia est exploité par mode à ciel ouvert. L'ouverture du champ de la carrière nécessite le creusement d'une demi tranchée partant de la base de l'anticlinale jusqu'à son sommet. Cette demi-tranchée est commune à tous les niveaux d'exploitations.

Quant à la méthode d'exploitation utilisée dans la carrière de Djebel Safia, elle se

caractérise par un seul bord exploitable disposé longitudinalement selon la méthode de « Rjevsky. V ». Suivant le pendage, communément appelée fonçage.

Ces travaux d'ouverture ont été réalisés par les travaux de forage et de tir compte tenu de la dureté des roches ($f=6\div9$). Le forage s'effectue par des trous principaux (verticaux), puis on chemine avec le creusement des trous horizontaux afin d'établir un circuit au moment de tir et dans le but de créer un gradin à battre. L'étape suivante est le remplissage des trous par des explosifs tels que la marmanite, l'anphomite. L'emploi de ces explosifs est nécessaire pour la préparation des roches minières à l'extraction. La quantité sautée après le tir est de 30.000 tonnes.

1.4.2. Argile

Observées au microscope, les argiles ont la forme de plaquettes, ce qui explique leur plasticité. La plupart de ces particules proviennent de la désagrégation de roches silicatées : du granite (mica et feldspath), du gneiss ou encore des schistes. Ces particules sont transportées par le vent ou l'eau sous forme de limon ou de vase. Les fleuves véhiculent des argiles qui finissent par se déposer en alluvions, dans le cours d'eau lui-même, à son embouchure, dans un lac ou dans la mer. Les dépôts peuvent alors sédimenter et former une roche argileuse par diagenèse : déshydratation et compactage. En tant que roches sédimentaires, les affleurements argileux présentent une succession de strates empilées les unes sur les autres, qui ressemblent à un feuillet.

Une argile utilisée à Hdjar-Soud se trouve à 3 km de l'usine dans la commune de l'Oued el-Kebir. L'exploitation se fait par ripage à l'aide d'une pelle mécanique parce que l'argile est une roche tendre à contrairement au calcaire, ensuite on forme des tas. Elle est par la suite chargée sur camions à l'aide de chargeuse pour être acheminée vers l'usine.

Liste Bibliographique

Liste bibliographique :

- Basse-Mens, C. « Propositions pour une adaptation d'Analyse de Cycle de Vie aux systèmes de production agricole - mise en œuvre pour l'évaluation environnementale de la production porcine ». 2005. Thèse de Doctorat. Institut Nationale de la Recherche Agronomique (INRA) Rennes. France.
- Benabi. A 2017. Elle va exporter du ciment en Afrique de l'Ouest : Lafarge-Holcim tient son engagement. online at : <https://www.algerie1.com/economie/elle-va-exporter-du-ciment-en-afrique-de-l-ouest-lafarge-holcim-tient-son-engagement>
- Blezard. R.G., 2000. *Reflections on the history of the chemistry of cement*. SCI Lecture Papers Series LPS 0104 (2000)
- CEMBUREAU, 1999. Best Available Techniques (BAT) for the cement industry. Online at: <http://www.ztch.umcs.lublin.pl/materialy/batcement.pdf>
- CML, Environmental Sciences Institute (CML). 2007. [On line at: <http://www.coprocessing.info/glossary/cml-method.htm>].
- Cooper JS. Specifying functional units and reference flows for comparable alternatives. The International Journal of Life Cycle Assessment. 2003; 8(6): 337–49.
- Eco-indicator 99. A damage oriented method for life cycle impact assessment. 2000. [On line at: <http://www.pre-sustainability.com/eco-indicator-99-manuals>].
- ECN, 2011. Environmental Criteria for Cement Based Products. Energy Research Center of Netherlands (ECN). Online at: <http://www.ecn.nl/docs/library/report/2011/e11020.pdf>
- EDIP. Environmental Design of Industrial Products (EDIP). 1999. [On line at: http://orbit.dtu.dk/fedora/objects/orbit:58714/datastreams/file_4646274/content].
- EEA, European Environment Agency (EEA). 1997. Life Cycle Assessment (LCA): A guide to approaches, experiences and information sources. Pp 116.
- Finnveden G, Michael Z, Hauschild M, Ekvall T, Guinée J, Heijungs R, et al. Recent developments in life cycle assessment. J Environ Manag 2009;91(1):01–21.
- JLB., 2000. *Liants hydrauliques*. Lycée Adolphe CHERIOUX. Online at : http://lycee-cherioux.fr/Mooc/materiau/liants/~gen/liants.publi/web/co/liants_18.html

Liste Bibliographique

- J.M, Raymond, 2017. Deux siècles déjà de ciment Portland. Online at : <http://lenouvelliste.com/article/167697/Deux%20si%C3%A8cles%20d%C3%A9j%C3%A0%20de%20ciment%20Portland>
- Jolliet O, Margni M, Charles R, Humbert S, Payet J, Rebitzer G, Rosenbaum R. IMPACT 2002+: A new life cycle impact assessment methodology. The International Journal of Life Cycle Assessment. 2003; 8 (6): 324-330.
- Infociments, 2017. Histoire des ciments. Online at: <http://www.infociments.fr/ciments-chaux-hydrauliques/historique>
- International Standard Organization (ISO) 14043. Environmental management—life cycle assessment: Life cycle interpretation. Geneva, Switzerland, 2000b.
- International Standard Organization (ISO) 14025. Environmental labels and declarations— Type III environmental declarations—Principles and procedures. Geneva: International Organization for Standardization; 2006a.
- International Standard Organization (ISO) 14040. Environmental management—life cycle assessment: principles and framework. Geneva: International Organization for Standardization; 2006a.
- International Standard Organization (ISO) 14044. Environmental management—life cycle assessment: requirements and guidelines. Geneva: International Organization for Standardization; 2006b.
- Ghoualmi. H 2016. Ciment-L'Algérie enregistrera un excédent de production de 2 millions de tonnes à partir de 2017. Online at : <http://maghrebemergent.com/economie/algerie/57819-ciment-l-algerie-enregistrera-un-excedent-de-production-de-2-millions-de-tonnes-a-partir-de-2017.html>
- GICA, 2015. Groupe de l'Industrie de Ciments d'Algérie. Présentation de groupe GICA. Online at: <http://www.gica.dz/>
- Guinée J.B, Gorrée M, Heijungs R, Huppes G, Kleijn R, De Koning A, Van Oers L, Wegener Sleeswijk A, Suh S, Udo de Haes H.A, De Bruijn H, Van Duin R, Huijbregtsn MAJ. Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards. I: LCA in perspective. Iia: Guide. Iib: Operational annex. III: Scientific background. 2002. Kluwer Academic Publishers ISBN 1-4020-0228-9.

Liste Bibliographique

- Khelifa, M.R, 2009. Effet de l'attaque sulfatique externe sur la durabilité des bétons autoplaçants. Thèse de doctorat. Université d'Orléans. Online at: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00464699/document>
- Klüppel H.J. The Revision of ISO Standards 14040–3. The International Journal of Life Cycle Assessment. 2002: 10 (3): 165.
- LAFARGE., 2009. Formation en Ciment Portland. Online at : lmi.cnrs.fr/IMG/pdf_Cours_UCB_2009_B_Albert.pdf
- Larousse Française., 2017. Dictionnaire de la langue française. Online at: <http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/ciment/16019>
- Lewandowska A, Matuszak-Flejszman A, Joachimiak K, Ciroth A. Environmental life cycle assessment (LCA) as a tool for identification and assessment of environmental aspects in environmental management systems (EMS). International Journal of Life Cycle Assessment. 2011: 16 (3): 247-257.
- Makhlouf A. Analyse entrée-sortie des déchets : analyse de cycle de vie des fertilisants produits en Algérie : Thèse de doctorat en management de l'environnement, Annaba, Université de Badji Mokhtar, 2015, 163p.
- Matthew J.T, Jennifer L.K, Denise R.P. Life-cycle assessment as a sustainability management tool: Strengths, weaknesses, and other considerations. Environmental Quality Management. 2011: 20 (3): 1-10.
- Michael.J, 2001. Emissions from cement production CO2. IPCC. Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories.
- Patoine M, 2012. Guide sur l'analyse de cycle de vie et la production d'une déclaration environnementale de type III. Maitrise en environnement: Université de Sherbrook, 2012, 201p.
- Pré Consultant. GEMIS 4.7, Life cycle assessment software package, Global Emission Model for integrated systems, Version 4.7. Öko-Institut; 2011 [On line at: <http://www.gemis.de>].
- Pré Consultant. SimaPro 7, product ecology consultants. Version 7. Introduction into LCA. Pré Consulting Company; 2012 [Online at: <http://www.pre.nl/simapro/manuals/default.htm>].

Liste Bibliographique

Pré Consulting. CMLCA, A software tool for Life Cycle Assessment studies. Institute of Environmental Sciences (CML), Chain Management by Life Cycle Assessment; 2014 [On line at: <http://www.leidenuniv.nl/interfac/cml/ssp/software/cmlca/index.html>].

Pré Consulting. TEAM 5.2, Life cycle assessment software package, Version 5.2. EcoBilan Society; 2014 [On line at: <http://ecobilan.pwc.fr/fr/boite-a-outils/team.jhtml>].

Rahmouni. Z., 2017. L'Algérie peut-elle vraiment exporter son excédent de ciment. Online at : <https://www.dzairnews.com/articles/tsa-l-algerie-peut-elle-vraiment-exporter-son-excedent-de-ciment>

Raymond, JM. 2017. Deux siècles déjà de ciment Portland. Online at : <http://lenouvelliste.com/article/167697/Deux%20si%C3%A8cles%20d%C3%A9j%C3%A0%20de%20ciment%20Portland>