



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



Université des Frères Mentouri Constantine
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

جامعة الاخوة منتوري قسنطينة
كلية علوم الطبيعة و الحياة

Département : Biologie Et Ecologie Végétale

قسم : بيولوجيا و البيئة النباتية

Mémoire présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Ecologie et environnement

Spécialité : Ecologie fondamentale et appliquée

N° d'ordre :

N° de série :

Intitulé :

**Contribution à l'évaluation qualitative et quantitative
des émissions dans l'industrie cimentaire : cas de l'unité
Djouad Tahar (Hamma Bouziane)**

Présenté et soutenu par : DJESSAS Kaouther

GHOMRANI Ikram

Jury d'évaluation :

Président du jury : BAZRI Kamel Eddine MCA-UFM Constantine 1

Rapporteur : SAHLI Leila MCA-UFM Constantine 1

Examineurs : ZAÏMECHE Saida MCB-UFM Constantine 1

*Année universitaire
2018 - 2019*

Sommaire

Dédicaces

Remerciements

Résumé

abstract

الملخص

Liste d'abréviations

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction **1**

Chapitre 1 : Synthèse bibliographique

1. Généralités sur la pollution atmosphérique **4**

1.1 Définition de l'atmosphère **4**

1.2 Les couches de l'atmosphère **4**

1.3 Composition de l'atmosphère **4**

1.4 Définition de la pollution atmosphérique **5**

1.5 Les principaux polluants atmosphériques et leur classification **5**

1.6 Les principales sources de pollution atmosphérique **6**

1.6.1 Le secteur énergétique **7**

1.6.2 Le secteur de l'industrie **7**

1.6.3 Le secteur des transports **7**

1.6.4 L'activité agricole **7**

1.7 Les facteurs météorologiques influençant la dispersion des polluants **7**

1.7.1 La pression atmosphérique **7**

1.7.2 Le vent **8**

1.7.3 La température	8
1.7.4 Les précipitations	8
1.8 Fonctionnement du système atmosphérique	8
1.8.1 Emission, transport, dégradation et dépôt	8
1.8.2 Modèles de chimie de transport	9
1.9 Impacts de la pollution atmosphérique sur l'homme et l'environnement	9
1.9.1 Les effets sur la santé	9
1.9.2 Effets sur l'environnement	10
a. L'acidification	10
b. L'effet de serre	12
c. La destruction de la couche d'ozone	12
1.9.3 La dégradation du patrimoine bâti	13
2. Les polluants générés par les cimenteries : cas de l'industrie Djoued Taher-Hamma Bouziane	13
2. 1 Polluants gazeux	15
a. Le dioxyde de soufre (SO ₂)	15
b. Les oxydes d'azote (NO _x)	15
c. Le monoxyde de carbone (CO)	16
d. Le dioxyde de carbone (CO ₂)	16
2. 2 Poussières	16
2. 3 Normes Algériennes relatives à la qualité de l'air	17

Chapitre 2 : Matériel et méthodes

1. Présentation de l'établissement d'accueil (cimenterie Hamma Bouziane)	18
1.1 Historique	18
1.2 Localisation	18
1.3 Climat et végétation	20
1.4 Hydrographies	20
1.5 Organisation de la direction générale	20

1.6 Fabrications du ciment	21
1.6.1 L'extraction des matières premières	21
1.6.2 La préparation du cru	22
1.6.3 La cuisson	22
1.6.4 L'obtention du ciment	23
2. Durée et lieu du stage	25
3. Rythme et nature des mesures	25
4. Description des systèmes d'analyse des gaz	26
4.1 Description du système d'analyse des gaz OXYMAT 61	28
4.2 Description du système d'analyse des gaz ULTRAMAT 23	28
4.3 Estimation des émissions du dioxyde de carbone (CO ₂)	29
5. Analyse des émissions en SO₂ et en poussières	30
5.1 Description du système d'analyse des gaz testo 350	30
5.2 Les appareils d'analyses des rejets de poussières-Dust Emission Monitor (DEM100)	31
6. Traitement des données	32
Chapitre 3 : Résultats et discussion	
1. Les émissions en NO_x	34
2. Les émissions en CO	35
3. Les émissions en O₂	37
4. Les émissions en CO₂	39

5. Les émissions en SO₂	40
6. Les émissions de poussière (PM)	41
Conclusion et perspectives	45
Références bibliographiques	47
Annexes	

Remerciements

Avant tout, nous remercions notre « Dieu », qui nous a accompagnés et nous a donné la force, la puissance, la volonté et le courage nécessaires pour affronter toutes les difficultés et les obstacles qui se sont hissés au travers de notre chemin durant toutes nos années d'études.

On tient à exprimer toute notre reconnaissance à notre encadreur M^{me} SAHLI Leila. Nous la remercions pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, ses encouragements, ses conseils, sa rigueur et sa disponibilité durant la préparation de ce mémoire.

Nous avons un grand honneur à présenter nos remerciements à tous les enseignants du département de Biologie et Ecologie végétale. Merci de nous avoir fait profiter de votre expérience scientifique, des leçons précieuses, des conseils et orientations prodigués tout au long de notre parcours.

Nous tenons également à remercier les membres de jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'examiner ou encore présider notre jury.

Nous remercierons tous le personnel de la cimenterie de Hamma Bouziane. Qui nous ont aidés pour le développement et la réalisation de ce modeste travail.

Nos plus sincères remerciements aux parents pour leur soutien et leur aide.

Enfin, nous remercierions toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicaces Ikram

*Ce modeste travail est le fruit de plusieurs années de labeurs et de sacrifices sans relâches;
Je dédie ce modeste travail à :*

- ❖ *La mémoire de mon grand père paternel HACEN qui restera toujours dans mon esprit et dans mon cœur.*

- ❖ *Ma famille qui n'a cessé de me soutenir et de m'encourager pendant toute la période de mes études : mes chers parents RACHID et RATIBA BOUAZIZ, mon grand père maternel AHMED, mes grandes mères FATIMA ZOHRRA et SASSIA, mon petit frère ILYES, ma petite sœur AMANI, mes oncles et mes tantes, mes cousins et cousines.*

- ❖ *Mes amies, mes proches que j'adore.*

J'espère que je vous ai honoré.

Dédicaces Kaouther

*Ce modeste travail est le fruit de plusieurs années de labeurs et de sacrifices sans relâches;
Je le dédie à :*

- ❖ *Mes parents : Mohammed et Amel car nul autres qu'eux ne se sont sacrifiés pour mon bien et pour l'accomplissement de mes études. Ils ont fait de moi ce que je suis aujourd'hui.*
- ❖ *Mes adorables sœurs : Rayane et Meriem.*
- ❖ *Mes tantes : Laila et Wafia.*
- ❖ *Toute ma famille.*
- ❖ *Mes chers (es): Oussama, Riad, Karim, Yahia, Yacine, Mahdi, Doua, Yakine, Amira, Imen, Kenza et Fadila.*

J'espère que je vous ai honoré.

Résumé :

La pollution de l'air résulte de multiples facteurs anthropiques et surtout ceux industriels. La pollution atmosphérique et spécialement celle résultante des émissions des cimenteries est un phénomène très complexe compte tenu de la diversité des polluants. Les niveaux de cette pollution dépendent de la nature et des conditions de rejets ainsi que des conditions atmosphériques qui déterminent le transport, la diffusion et le dépôt de ces polluants.

L'industrie cimentière, utilisant un processus basé sur une combinaison physico-chimique à très haute température, se caractérise par sa consommation intensive en énergie et des émissions atmosphériques importantes de poussière, NO_x, SO₂, CO et CO₂ ayant un impact environnemental conséquent sur l'environnement et la santé.

A cet effet notre stage de fin d'étude effectué au niveau de la cimenterie "TAHAR DJOUAD" de Hamma Bouziane nous a permis d'effectuer une évaluation qualitative et quantitative des émissions de ladite cimenterie durant la période allant du mois de sept 2018 au mois de mars 2019. Des suivis horaires, journaliers, mensuels voir trimestriels ont été effectués pour les émissions des polluants suivants : NO_x, CO, CO₂, SO₂ et taux de poussières.

Les résultats obtenus montrent que les concentrations des gaz (NO_x, SO₂) et de poussières sont dans l'ensemble respectées. Contrairement à ces derniers les taux en CO et CO₂ posent problèmes. Ces derniers étant 4 à 6 fois supérieurs aux normes fixées par la réglementation algérienne.

Mots clés : Cimenterie Hamma Bouziane, NO_x, CO, CO₂, O₂, SO₂, poussières.

ملخص :

ينتج تلوث الهواء عن عوامل بشرية متعددة وخاصة العوامل الصناعية. هذا النوع من التلوث وخصوصًا الناتج عن انبعاثات مصانع الأسمنت يعتبر ظاهرة معقدة للغاية بالنظر إلى تنوع الملوثات. تعتمد مستويات هذا التلوث على طبيعة وظروف التصريف والظروف الجوية التي تحدد نقل، إطلاق وترسب هذه الملوثات. تتميز صناعة الأسمنت، باستخدام عملية تعتمد على تركيبة فيزيائية-كيميائية في درجات حرارة مرتفعة للغاية، باستهلاكها المكثف للطاقة وانبعاثات غزيرة من الغبار، أكاسيد النيتروجين، ثاني أكسيد الكبريت، أول أكسيد الكربون وثاني أكسيد الكربون حيث ان لهم تأثير كبير على البيئة و على الصحة. مكننا التربص الداخلي على مستوى مصنع الأسمنت "طاهر جواد" بالحامة بوزيان من إجراء تقييم نوعي وكمي لانبعاثات مصنع الأسمنت خلال الفترة الممتدة من سبتمبر 2018 إلى مارس 2019. حيث تم إجراء مراقبة و متابعة ساعية، يومية، شهرية و ربع سنوية لانبعاثات الملوثات التالية : أكاسيد النيتروجين وأول أكسيد الكربون وثاني أكسيد الكربون وثاني أكسيد الكبريت و الغبار. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن تركيزات الغازات (أكاسيد النيتروجين، ثاني أكسيد الكبريت) والغبار محترمة بشكل عام. على النقيض من ذلك ، فإن انبعاثات تركيزات اول أكسيد الكربون وثاني أكسيد الكربون تطرح مشاكل. هذه الأخيرة تطرح بكميات تفوق 4 إلى 6 أضعاف المعايير المحددة في اللوائح الجزائرية.

الكلمات المفتاحية :

مصنع الإسمنت حامة بوزيان ، أكسيد النيتروجين ، اول أكسيد الكربون ، ثاني أكسيد الكربون، الاكسجين، ثاني أكسيد الكبريت، الغبار.

Abstract:

Air pollution is the result of anthropogenic factors mainly the industrial ones. Atmospheric pollution especially the one resulting from cement industries is a complex phenomenon due to the large variety of pollutants. The level of this pollution depends on the nature and the conditions of the emissions as well as the atmospheric conditions that determine the transport, the spreading and the fallouts of the pollutants.

The cement industry, uses a process based on a high temperature physicochemical combination, characterized by the intensive consumption of energy and important atmospheric emission of dust, NO_x, SO₂, CO and CO₂ impacting the environment and health.

Our internship done in the cement industry "TAHAR DJOUAD"-Hamma Bouziane allowed us to conduct a qualitative and quantitative evaluation of emissions from september 2018 to march 2019. Hourly, daily and monthly follow-ups were performed for the following pollutants: NO_x, CO, CO₂, SO₂ and the level of dust.

The results showed that the concentration of the gas (NO_x, SO₂) and dust were respected on the whole. On the contrary, the levels of CO and CO₂ are problematic. Concentrations were 4 to 6 times higher than the Algeria guidelines.

Key words : HAMMA BOUZIANE cement plant, NO_x, CO, CO₂, O₂, SO₂, dust.

Liste des abréviations

% : Pourcentage

°C : Degré Celsius

ADN: Acide désoxyribonucléique

Br₂ : Dibrome

BrONO₂ : Bromine nitrate

C : Carbone

CaCO₃ : Carbonates de calcium

CETIM : Centre d'Etudes et de services Technologiques de l'Industrie des Matériaux de construction

CFC : Chlorofluorocarbures

Cl₂ : Dichlore

ClONO₂ : Nitrate de chlore

cm : Centimètre

CO : Monoxyde de carbone

CO₂ : Dioxyde de carbone

COV: Composés Organiques Volatils

COVNM : Composés Organiques Volatils Non Méthanique

DA : Dinar Algérien

Déc : Décembre

FAM : Filtre à manches

Fév : Février

G.I.C.A : Groupe Industriel des Ciment D'Algérie

H : Hydrogène

H₂O : Eau

H₂S : Sulfure d'hydrogène

H₂SO₄ : Acide sulfurique

ha: Hectare

HBr : Bromure d'hydrogène

HCl : Acide chlorhydrique

HNO₃ : acide nitrique

HOBr : Acide hypobromeux

HOCl : Acide hypochloreux

Hz : hertz

ISO : Organisation Internationale de Normalisation

Jan : Janvier

kk : Clinker

km : Kilomètre

kV: Kilo Volte

m/s : Mètre par seconde

m: Mètre

m³/heur : Mètre cube par heur

Mar : Mars

max : Maximum

mg/m³ : Milligramme par mètre cube

mg/Nm³ : Milligramme par nanomètre cube

min : Minimum

mm: Millimètre

N : Azote

N₂ : Nitrogène

N₂O : Peroxyde d'azote

NA : Norme Algérienne

NE : Nord Est

NF : Norme Française

NH₄ : Ammoniaque

Nm³/heur : Nanomètre cube par heur

NO : Nord Est

Nov : Novembre

NO_x : Oxydes d'azote

O₃ : Ozone

Oct : Octobre

OH : Ion hydroxide

ppm : Partie par million

PM : Particulate matter

S : Soufre

S.C.H.B : La société des ciments de Hamma Bouziane

SE : Sud Est

SE-NO : Sud Est-Nord Ouest

Sep : Septembre

SNMC : Société Nationale des Matériaux de Construction

SO₂ : Dioxyde de soufre

SO₃ : Trioxyde de soufre

SO_x : Oxyde de soufre

t : Tonne

UV : Ultra violet

Liste des tableaux

Tableau 01 : Composition de l'atmosphère (Ramade, 2011)	5
Tableau 02 : Les principaux polluants atmosphériques et leur classification	6
Tableau 03 : Conséquences de l'acidité de l'eau sur les poissons (Louiset, 2000)	11
Tableau 04 : Les principaux polluants émis par la cimenterie Hamma Bouziane	15
Tableau 05 : Normes algériennes de la qualité de l'air à l'émission	17
Tableau 06 : Quantité de gaz consommé et production de clinker (Sept 2018-Mar2019)	30
Tableau 07 : Données statistiques des paramètres mesurés (Sept 2018-Mar2019)	33
Tableau 08 : Variations temporelles des taux en SO ₂ émis par la cimenterie Hamma Bouziane	40
Tableau 09 : Variations temporelles des taux en poussières émises par la cimenterie Hamma Bouziane	42

Liste des figures

Figure 01 : Pourcentage d'émission des principaux polluants par secteur (CITEPA, 2010)	6
Figure 02 : Processus biogéochimiques résultant de dépôts acides imputables à la pollution atmosphérique (Lovett et al. 2009)	11
Figure 03 : Polluants atmosphériques associés à l'industrie du ciment	14
Figure 04 : Localisation géographique de la cimenterie Hamma Bouziane	19
Figure 05 : Organigramme de la Cimenterie-Unité Djouad Tahar	21
Figure 06 : Vue d'ensemble de la carrière de Jebel Saleh	22
Figure 07 : Aspect du produit semi fini clinker	23
Figure 08 : Plan d'organisation des ateliers et emplacement des filtres au niveau de la cimenterie Hamma Bouziane	24
Figure 09 : Calendrier de la caractérisation des rejets de la cimenterie Hamma Bouziane	25
Figure 10 : Système de contrôle des mesures de gaz	27
Figure 11 : OXYMAT 61, description du clavier à membrane et de l'écran graphique	28
Figure 12 : ULTRAMAT 23, description du clavier à membrane et afficheur graphique	29
Figure 13 : Appareil de mesure des émissions de SO ₂ -Testo 350	31
Figure 14 : Appareil de contrôle des rejets de poussières-DEM100	31
Figure 15 : Variations temporelle des émissions moyennes en NO _x (Sept 2018-Mars 2019)	34
Figure 16 : Variations temporelles des émissions moyennes en CO (Sept 2018-Mars 2019)	36
Figure 17 : Variations temporelles des émissions moyennes en O ₂ (Sept 2018-Mars 2019)	38
Figure 18 : Variations temporelles des émissions moyennes en CO ₂ (Sept 2018-Mars 2019)	39
Figure 19 : Variations temporelles des émissions de de poussières (Oct-Déc 2018 et Jan-Mar 2019)	42
Figure 20 : Émissions de poussières ramenées à la tonne de clinker produite	44

Introduction

L'Algérie a connu une croissance économique significative pendant les 40 dernières années, qui a été marquée par un développement important de l'industrie. En conséquence, un grand nombre d'industries s'est établi dans le nord du pays, près des grandes zones urbaines, notamment l'industrie du ciment. Néanmoins, le développement durable n'a pratiquement pas été pris en compte. Les technologies ont été choisies exclusivement en fonction du critère de productivité et très souvent aux dépens de la pollution. L'Algérie doit donc faire face aujourd'hui à un grave problème de pollution. L'industrie, et plus concrètement le secteur des mines et des industries pétrochimiques, chimiques et métallurgiques, est le principal responsable de la pollution de l'environnement en Algérie (Centre d'activités régionales pour la production propre-CAR/PP, 2008).

Le ciment est le matériau de base utilisé pour la construction de bâtiments et d'ouvrages de génie civil. Avec le boom du logement enregistré par l'Algérie, depuis 1999, l'industrie du ciment a connu un essor considérable lui permettant d'être au centre de l'intérêt. Depuis quelques années, les niveaux de production ont nettement évolué et les acteurs de la filière redoublent d'efforts en vue d'assurer un approvisionnement suffisant et régulier du marché national, afin de mettre un frein aux importations de ce matériau très demandé, et à très court terme cesser toute importation. La consommation nationale se situe aujourd'hui à plus de 23 millions de tonnes annuellement, et la demande va continuer d'augmenter pour atteindre 28 millions de tonnes à l'horizon 2020. L'offre, quant à elle, était aux alentours de 25 millions de tonnes en 2017. Année durant laquelle l'offre a excédé la demande, grâce à l'entrée en production des investissements engagés par le Groupe Industriel des Ciments d'Algérie (GICA) ainsi que l'entrée en activité de plusieurs nouvelles cimenteries réalisées par des opérateurs privés (Bahamid, 2017).

La cimenterie Hamma Bouziane produit du ciment avec la voie sèche. La production de clinker à l'aide d'un four rotatif nécessite une température élevée de chaleur qui peut atteindre 1500°C. Les aspects environnementaux associés à l'industrie du ciment peuvent être divisés en deux groupes : ceux qui sont associés à l'étape d'extraction des matières premières et ceux qui sont associés aux étapes de production du clinker et du ciment (Belboom 2008 ; Hadjoudj et Khalfallah, 2016 ; Bahamid, 2017).

Les aspects environnementaux associés à l'extraction des matières premières regroupent principalement la détérioration des paysages et du milieu naturel, le bruit, les vibrations et la poussière produite par les explosions, et les activités de la carrière elle-même.

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 mis 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 dibenzo-p-dioxines et de dibenzofurannes polychlorés, de carbone organique total, de métaux, de chlorure d'hydrogène et de fluorure d'hydrogène (Pillet et al. 2002). 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. Il est communément admis que la fabrication d'une tonne de ciment libère près d'une tonne de CO₂ dans l'atmosphère, que plus de 60% des émissions de CO₂ sont produites durant la phase de décarbonatation et que la production de ciment est responsable d'environ 5% des émissions de CO₂ de la planète.

C'est dans cette optique que nous avons orienté notre étude relative à l'évaluation de la qualité des émissions de la cimenterie de Hamma Bouziane durant la période allant du mois de septembre 2018 au mois de mars 2019. Nous nous sommes fixés les objectifs suivants :

- ✚ Suivre et quantifier les émissions horaires des oxydes d'azote (NO_x), du monoxyde de carbone (CO) et de l'oxygène (O₂),
- ✚ Suivre et estimer les émissions mensuelles en dioxyde de carbone (CO₂),
- ✚ Suivre et quantifier les émissions trimestrielles en dioxyde de soufre (SO₂) et en poussières,

Ce mémoire s'articule en trois chapitres principaux :

- ✚ **Le premier chapitre** décrit des généralités sur la pollution atmosphérique, les principaux polluants atmosphériques, leurs sources, leur classification, leurs impacts sur la santé humaine et sur l'environnement. Dans ce même chapitre, le cas particulier des rejets de la cimenterie Hamma Bouziane a également été pris en considération.
- ✚ **Le deuxième chapitre** présente la cimenterie Hamma Bouziane, sa localisation, son climat et sa végétation, ainsi que les procédés de fabrications du ciment au niveau de ladite industrie. Dans ce même chapitre, sont décrits les différentes méthodes et appareils utilisés pour la quantification des différents types de polluants.

- ✚ **Le troisième chapitre** est consacré à la présentation et la discussion des résultats obtenus lors du suivi des gaz et de poussières émis par la cimenterie Hamma Bouziane.
- ✚ Auparavant, **une introduction** permettant de cerner la problématique est présentée au début du document, et **une conclusion** et **des perspectives** à la fin du présent manuscrit.

Chapitre 1 : Synthèse bibliographique

1. Généralités sur la pollution atmosphérique :

Ce chapitre a pour but d'apporter une vision d'ensemble des questions touchant la pollution atmosphérique, ses origines, et ses conséquences. Notons qu'à la fin de ce chapitre, on mettra le point sur les polluants générés par la cimenterie Hamma Bouziane.

1.1 Définition de l'atmosphère :

L'atmosphère est l'enveloppe essentiellement gazeuse qui entoure le globe terrestre. Son épaisseur ne peut être déterminée de façon précise. La densité de l'air décroît progressivement avec l'altitude. A haute altitude, plus de 1000 km, on passe insensiblement d'un milieu gazeux au vide interplanétaire. On peut cependant affirmer avec certitude que 99 % de la masse de l'atmosphère se situe en dessous de 30 km (Huber, 2007).

1.2 Les couches de l'atmosphère : l'atmosphère est constituée de 4 couches principales :

- **Troposphère** : se situe habituellement entre 9 et 12 km, la température est aux alentours de -55 °C voir -60 °C. A partir de ce niveau on pénètre dans la stratosphère.
- **Stratosphère** : la température augmente alors pour atteindre environ 0°C vers 50 km ou se situe la stratopause.
- **Mésosphère** : la température décroît jusque vers -80 °C, et dont la limite supérieure la mésopause, se situe vers 80 km d'altitude.
- **Thermosphère** : au sein de laquelle la température s'élève de nouveau, pouvant atteindre 500 °C. C'est dans cette zone que se trouvent les principales couches ionisée qui jouent un grand rôle dans la propagation des ondes radioélectriques (Huber, 2007).

1.3 Composition de l'atmosphère :

La composition de l'atmosphère terrestre au voisinage du sol est bien connue. L'air représente environ 98 % de la masse de cette atmosphère, le surplus est constitué d'eau, condensée ou sous forme de vapeur, et d'aérosols divers (tab. 01). La composition volumétrique des principaux composants de l'air est remarquablement stable jusqu'à environs 80 km d'altitude (Huber, 2007 ; Ramade, 2011).

Tableau 01 : Composition de l'atmosphère (Ramade, 2011)

Constituants	Volume en pourcentage
Azote	78 ,01
Oxygène	20,95
Argon	0,93
CO ₂	0,038
Néon	1,8 10 ⁻³
Hélium	5,24 10 ⁻⁴
Méthane	1,7 10 ⁻⁴
Krypton	1,14 10 ⁻⁴
N ₂ O	5.10 ⁻⁵
Hydrogène	5.10 ⁻⁵
Co	1.10 ⁻⁵
O ₃	10 ⁻⁶ à4.10 ⁻⁶
NH ₃	1.10 ⁻⁶ à 3.10 ⁻⁶
Peroxyde d'azote	1.10 ⁻⁷
SO ₂	2.10 ⁻⁶ à 1.10 ⁻⁶

1.4 Définition de la pollution atmosphérique :

La pollution de l'air (ou pollution atmosphérique) est l'altération de la pureté de l'air par une ou plusieurs substances ou particules présentes à des concentrations et durant des temps suffisants pour créer un effet toxique (Elichegaray, 2008). La pollution atmosphérique peut aussi être définie comme la présence d'impuretés dans l'air pouvant provoquer une gêne notable pour le confort ou la santé et un dommage aux biens. Cette pollution peut provenir de gaz, de vapeurs, de particules liquides ou solides ou encore de rayonnement. C'est aussi une modification chimique et physique du milieu naturel aboutissant à des effets nuisibles pour l'homme (Masclat, 2005).

En Algérie, la loi n°83-03 du 5 février 1983 relative à la protection de l'environnement définit la pollution de l'atmosphère comme étant : "L'émission dans l'air de gaz, de fumées ou de particules solides ou liquides, corrosifs, toxiques ou odorantes de nature à incommoder la population, à compromettre la santé ou la sécurité publique ou à nuire aux végétaux, à la production agricole et aux produits agro-alimentaires, à la conservation des constructions et monuments ou au caractère des sites".

1.5 Les principaux polluants atmosphériques et leur classification :

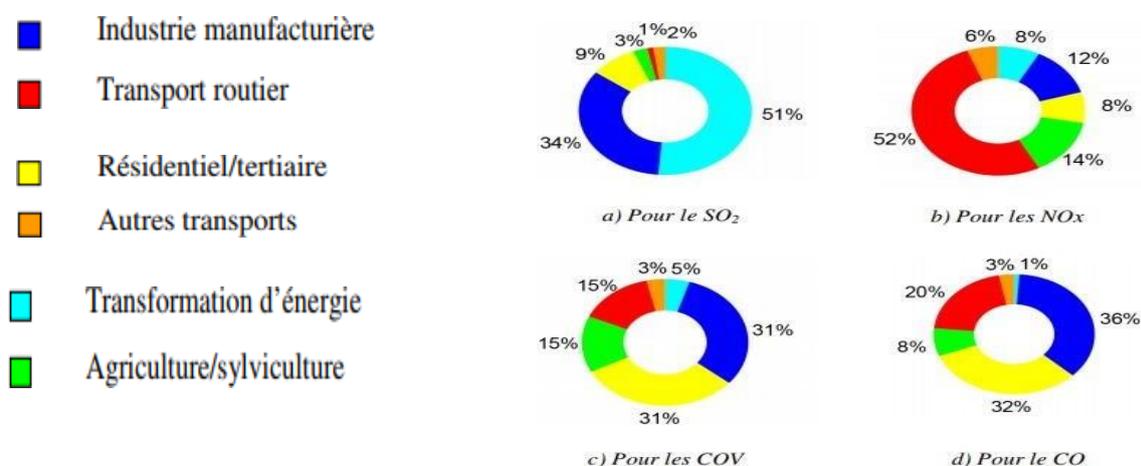
Selon Popescu et al (1998), les polluants émis peuvent être classés en fonction de leur nature et de leurs degrés de dispersion en : gaz ou substances inorganiques, gaz ou substances organiques, et aérosols (tab. 02).

Tableau 02 : Les principaux polluants atmosphériques et leur classification

Gaz ou substances inorganiques	Gaz ou substances organiques	Les aérosols
<ul style="list-style-type: none"> - Les dérivés oxygénés du soufre (dioxyde et trioxyde du soufre, acide sulfurique). - Les dérivés oxygénés d'azote (monoxyde et dioxyde d'azote). - Monoxyde et dioxyde de carbone. - Autres polluants inorganiques (dérivés du plomb, hydrogènesulfuré, ammoniac, chlore et chlorure, fluor et fluorure). 	<ul style="list-style-type: none"> - Les hydrocarbures, les aldéhydes, les cétones et les composés organiques du soufre. 	<ul style="list-style-type: none"> - Particules de matières solides (poussières et fumées) - Particules de matière liquide (brouillard, gouttelettes).

1.6 Les principales sources de pollution atmosphérique :

Bien que les rejets naturels de diverses substances contribuent à la pollution atmosphérique, les activités humaines présentent la principale source de polluants rejetés dans l'environnement (Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique-CITEPA, 2004). Les principaux secteurs contribuant à la pollution atmosphérique sont : le secteur énergétique, l'industrie, le transport et l'agriculture (fig. 01).

**Figure 01** : Pourcentage d'émission des principaux polluants par secteur (CITEPA, 2004)

1.6.1 Le secteur énergétique :

Il s'agit principalement des installations de combustion collectives et individuelles ou industrielles fournissant chauffages et énergie électrique ainsi que les installations d'incinération et de traitement de déchets et d'ordures ménagères (Lambert, 1995). Les principaux polluants atmosphériques émis par ce secteur sont : CFC, les métaux, CO, COV.

1.6.2 Le secteur de l'industrie :

Les procédés industriels responsables de la pollution de l'air sont : la pétrochimie, le raffinage, la cimenterie, la métallurgie, la sidérurgie, etc. Les principaux polluants atmosphériques émis par ce secteur sont : SO₂, NO_x, HCL, COV, CO, poussière.

1.6.3 Le secteur des transports :

Le trafic automobile est la cause principale de la pollution en ville en raison de l'augmentation constante du nombre de véhicules à moteur diesel et essence. Les principaux polluants atmosphériques émis par les véhicules sont : NO_x, CO, poussière (Hernandez, 2003).

1.6.4 L'activité agricole :

Le développement de l'agriculture intensive contribue à la pollution atmosphérique. Les principaux polluants issus de l'activité agricole sont : l'ammoniac, le méthane, le protoxyde d'azote, le monoxyde de carbone et les pesticides. Leurs émissions sont souvent liées à la décomposition des matières organiques, aux animaux d'élevage et à l'utilisation massive d'engrais et de pesticides.

1.7 Les facteurs météorologiques influençant la dispersion des polluants :

La dispersion des polluants s'effectue essentiellement dans la couche limite atmosphérique, couche la plus troublée, agitée sans cesse par des mouvements turbulents tant horizontaux que verticaux. Parmi les facteurs météorologiques qui interviennent soit directement, soit indirectement dans le transport et la dispersion des polluants, nous citons :

1.7.1 La pression atmosphérique :

Les situations dépressionnaires (basses pressions) correspondent généralement à une turbulence de l'air assez forte et donc de bonnes conditions de dispersion. En revanche, des situations anticycloniques (haute pression) ou la stabilité de l'air ne permet pas la dispersion des polluants entraînant des épisodes de stagnation de polluants (Michelot, 2014).

1.7.2 Le vent :

Le vent est l'un des paramètres météorologiques les plus importants pour le transport et la dispersion des polluants. Il intervient à toutes les échelles tant par sa direction que par sa vitesse. L'influence du vent sur la pollution atmosphérique est très variable selon la position de la source. Généralement la vitesse du vent augmente avec l'altitude. Au fur et à mesure que les polluants s'élèvent, la dispersion est facilitée par le vent. Plus le vent est fort, plus les niveaux de pollution seront bas. En revanche, un vent de faible vitesse favorise l'accumulation locale des polluants (Diaf et al. 2003).

1.7.3 La température :

La température agit sur la chimie des polluants. Le froid diminue la volatilité de certains gaz et donc limite leur dispersion tandis que la chaleur et le rayonnement solaire favorisent les processus photochimiques notamment la formation de l'ozone troposphérique (Michelot, 2014).

1.7.4 Les précipitation :

Les polluants ne séjournent pas à l'infini dans l'air, les précipitations contribuent à abaisser le niveau de pollution grâce aux gouttes d'eau qui captent les impuretés atmosphériques, (Popescu et al. 1998). Les pluies plaquent les particules au sol et peuvent dissoudre certains polluants. Elles contribuent au lavage ou lessivage de l'air (Viala, 1998).

1.8 Fonctionnement du système atmosphérique :

Le système atmosphérique débute par émission, dans la biosphère, de gaz et de particules à partir des sources naturelles ou anthropiques. Ces substances sont transportées par des processus divers, tout en réagissant entre elles durant ce transport. Elles finissent par se déposer et quitter le système atmosphérique.

1.8.1 Emission, transport, dégradation et dépôt :

La distribution spatio-temporelle des concentrations atmosphériques des polluants dépend de trois facteurs: (Masclat, 2005)

- La dynamique atmosphérique qui est un processus mécanique permettant le transport, le mélange, la dispersion et la dilution des polluants dans l'atmosphère,

- La dégradation chimique ou photochimique des polluants sous l'effet des radicaux de l'atmosphère ou de l'ozone. Ainsi, les polluants primaires se transforment en polluants secondaires,
- Les dépôts qui permettent d'éliminer les polluants de l'atmosphère. Il existe deux types de dépôts :
 - ✓ Le dépôt sec dû à la pesanteur ; les polluants se déposent sur le sol, sur les plantes et sur les feuilles des arbres,
 - ✓ Le dépôt humide dû au lessivage des polluants par les pluies, les neiges et les brouillards.

1.8.2 Modèles de chimie de transport :

Selon Masclat (2005), la détermination et la connaissance des espèces primaires et secondaires, la connaissance des profils verticaux et horizontaux de leurs concentrations, permettent de développer des modèles atmosphériques à diverses échelles :

- Echelle locale pour le développement des panaches de polluants et pour l'atmosphère urbaine,
- Echelle régionale dite méso-échelle pour la connaissance de la pollution sur une zone de 100 à 1000 km et pour décrire la pollution transfrontière,
- Echelle globale ou planétaire pour les modifications climatiques.

1.9 Impacts de la pollution atmosphérique sur l'homme et l'environnement :

Les impacts de la pollution de l'air dépendent de l'échelle spatio-temporelle. Sur le plan spatial, l'impact peut être local, régional, ou global, alors que sur l'échelle temporelle, on distingue généralement trois types de pollution : court-terme, moyen-terme, long-terme (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie-ADEME, 2003). Les principaux types d'impacts environnementaux des polluants atmosphériques pris en compte dans notre étude sont : les effets sur la santé, l'effet de serre, le trou de la couche d'ozone, les pluies acides, et la dégradation du patrimoine bâti.

1.9.1 Les effets sur la santé :

Les liens entre les pollutions atmosphériques et l'état de santé d'une population sont difficiles à établir. Cela tient aux multiples expositions à faibles doses, aux latences plus ou moins longues entre celles-ci et la survenue des effets de nature aiguë ou chronique, peu ou pas

spécifiques, et à l'existence de risques individuels faibles (Cassadou et al. 2004; Chiron, 2004). Quand les effets de la pollution sur la santé de l'homme sont abordés, l'échelle de gravité est large ; ça va de la simple gêne (yeux qui brûlent, nez qui pique) au décès, en passant par divers troubles respiratoires (asthme, allergies), toxicité, atteinte de la fonction reproductrice, cancers, etc (Aoudia, 2010).

1.9.2 Effets sur l'environnement :

a. L'acidification :

Le phénomène d'acidification est connu depuis longtemps et s'est accentué lors de la révolution industrielle. En 1872, le chimiste anglais Robert Angus Smith (Smith, 1872) mentionne pour la première fois le terme de pluies acides lors de l'étude de la ville industrielle de Manchester et ses environs (Luiset, 2000). L'acidification englobe toutes les formes de dépositions sèches et humides. Les deux acides que l'on peut trouver dans les dépôts acides sont l'acide nitrique (HNO_3) et l'acide sulfurique (H_2SO_4) (El Fuladi, 2002 ; Aoudia, 2010). Les composés précurseurs des acides sulfuriques et nitriques proviennent d'une part d'émissions naturelles notamment les émissions d'ammoniaque (NH_4), les embruns océaniques (HCl), les émissions volcaniques (SO_2 , H_2S), etc. Ils proviennent aussi des activités anthropiques notamment la combustion de carburants fossiles, les procédés industriels et les transports, etc. (El Fuladi, 2002). Les composés précurseurs se trouvent sous forme de gaz ou sont inclus dans des particules. Ils sont très solubles dans l'eau et ont un caractère acide. Ils sont piégés à la surface des gouttelettes d'eau en suspension dans l'atmosphère ou dans les nuages, et se transforment en acide nitrique (HNO_3) et acide sulfurique (H_2SO_4) (El Fuladi, 2002). Les gouttelettes entraînent alors ces derniers produits vers le sol lors de la déposition. Ces substances acides endommagent l'environnement lorsque celui-ci ne parvient pas à les neutraliser (Luiset, 2000). L'acidification peut par exemple diminuer le pH des sources ou des nappes phréatiques dans certaines conditions qui dépendent de la profondeur de la nappe, de la concentration en calcium du sol et de l'eau, et de la vitesse de ruissellement de l'eau piégée dans le sol en fonction des pressions (fig. 02).

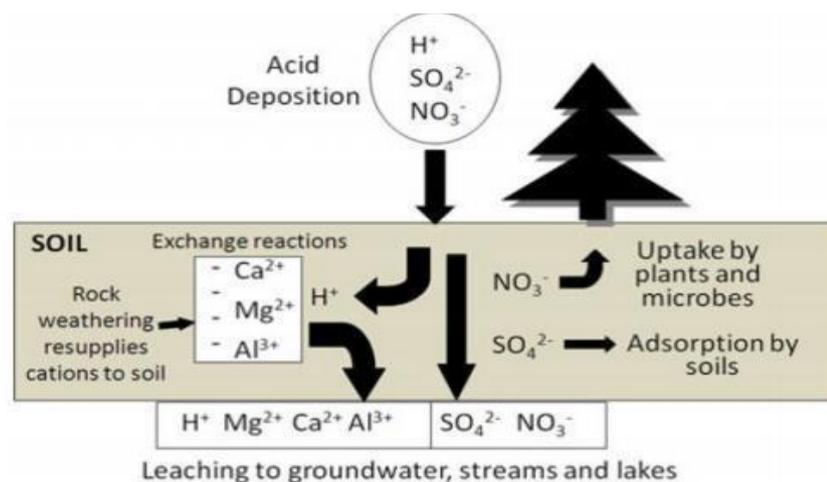


Figure 02 : Processus biogéochimiques résultant de dépôts acides imputables à la pollution atmosphérique (Lovett et al. 2009)

Le pouvoir tampon d'une eau est ainsi d'autant plus faible que la pluie qu'elle reçoit et le sol qui la porte sont acides. Ainsi, les espèces animales (batraciens, amphibiens, crustacés, poissons, mollusques, insectes, microorganismes) et les espèces végétales (plantes aquatiques, plancton, etc) subissent des altérations plus ou moins graves en fonction de l'acidité du milieu. Globalement les espèces animales sont plus vulnérables que les espèces végétales. Les poissons ont besoin par exemple pour vivre d'un pH compris entre 6.7 et 8.6. Lorsque le pH diminue et passe sous une valeur seuil de 5.6, la reproduction de ces animaux est compromise et la survie des œufs et alevins est précaire. Si le pH passe au dessous de 5, les jeunes poissons et les adultes d'espèces fragiles (truite, saumon) sont en danger. A un pH compris entre 4 et 5 la vie des poissons est impossible, alors que des espèces végétales peuvent résister (tab. 03). L'acidité peut en définitive briser des chaînes alimentaires et entraîner la disparition en cascade d'un grand nombre d'espèces.

Tableau 03 : Conséquences de l'acidité de l'eau sur les poissons (Louiset, 2000)

pH	Conséquences
5.5-6	La nourriture de base disparaît
5-5.5	Les poissons ne peuvent plus se reproduire. Les jeunes poissons ont de la difficulté à survivre. Augmentation du nombre de poissons adultes déformés. Des poissons meurent par suffocation (acidité diminue la fixation de l'O ₂)
4-5	Tous les poissons meurent
<4	Aucune vie animale ou végétale n'est possible

b. L'effet de serre :

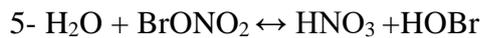
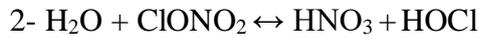
La Terre et spécialement sa surface absorbent le rayonnement solaire. Cette énergie est ensuite redistribuée par les circulations atmosphériques et océaniques et renvoyées dans l'espace à de plus grandes longueurs d'onde (infrarouge). En moyenne annuelle et pour la Terre dans son ensemble, l'énergie solaire arrivant au sommet de l'atmosphère (342 watts/m²) est plus ou moins égal à la somme de l'énergie absorbée puis rayonnée par la Terre (235 watts/m²) (atmosphère, continents, océans) et de l'énergie solaire réfléchiée par le globe terrestre (107 watts/m²) (Melieres, 2002). Le forçage radiatif est défini comme toute modification de l'énergie rayonnante nette propre au système Terre-atmosphère (Giec, 2001). Les polluants responsables d'une manière directe du forçage radiatif sont : (CO₂, CH₄, N₂O, O₃, les hydrocarbures qui contiennent du Cl, du F et du Br). Les polluants contribuant indirectement au réchauffement global sont : CO, NO_x, COVNM et CH₄). Les polluants contribuant indirectement au refroidissement global sont : halogènes, SO₂, aérosols.

Un forçage radiatif positif a tendance à réchauffer la surface terrestre et la basse atmosphère, tandis qu'un forçage négatif a tendance à les refroidir. Tout facteur qui modifie le rayonnement solaire ou celui qui est renvoyé dans l'espace, ou encore qui modifie la redistribution de l'énergie dans l'atmosphère ou entre l'atmosphère, les terres émergées et les océans, peut influencer sur le climat. Lorsqu'il se produit une modification du forçage radiatif, le système climatique réagit selon diverses échelles de temps. Toute modification du bilan radiatif de la Terre, notamment par suite d'un accroissement de la concentration des gaz à effet de serre ou des aérosols, influera sur le cycle hydrologique et les circulations atmosphérique et océanique à l'échelle du globe, ce qui ne manquera pas d'avoir des répercussions sur les conditions météorologiques ainsi que sur les régimes régionaux de la température et des précipitations (Giec, 2001 ; Jahnich, 2003).

c. La destruction de la couche d'ozone :

Le trou de la couche d'ozone correspond à la réduction de la couche d'ozone observée aux moyennes latitudes et aux pôles. La perte la plus importante et la plus significative ayant lieu en Antarctique, où pratiquement tout l'ozone est irrémédiablement détruit sur une superficie de la taille du continent antarctique et sur une épaisseur de plusieurs kilomètres dans la basse stratosphère, entre 12 km et 20 km (Legras, 2002). La chute de l'ozone est due à l'emploi de produits chimiques fabriqués par l'Homme, connus sous le nom de composés halogénés. Ces hydrocarbures halogénés rejetés au niveau du sol, s'élèvent progressivement dans l'atmosphère jusqu'à atteindre les couches où le rayonnement UV d'origine solaire est

suffisamment fort pour casser ces molécules et ainsi relâcher des atomes de chlore (ou de brome) actifs et potentiellement dangereux qui, sous certaines conditions, peuvent détruire l'ozone (Legras, 2002). Les principaux phénomènes de destruction de la couche d'ozone peuvent être résumés par les équations suivantes :



1.9.3 La dégradation du patrimoine bâti :

La dégradation du patrimoine bâti résulte principalement des émissions de particules et de produits corrosifs. Au sein des particules, ce sont surtout les particules de grandes tailles (suies, particules abrasives...) qui interviennent majoritairement. Au sein des produits corrosifs, les gaz aux propriétés acides ou oxydantes (HNO_3 , H_2SO_4 , O_3 ...) sont les principaux acteurs de la corrosion des matériaux (Baer et al. 1985; Thomson, 1986). La dégradation des bâtiments se caractérise par trois types d'affectations : les salissures, la corrosion, et les épaufrures.

Les salissures correspondent à la fixation de poussières sur la paroi des bâtiments et/ou à la non lixiviation de ces dernières par la pluie. Elles sont principalement dues aux particules issues des procédés de combustion, et en particulier aux transports. Elles engendrent des coûts de nettoyage pouvant être très élevés. La corrosion des bâtiments se traduit par une corrosion physique ou chimique des matériaux. La corrosion physique correspond à une érosion de la paroi des bâtiments se produisant par le passage d'un vent chargé de particules abrasives (sable par exemple). Les épaufrures correspondent à un éclatement du béton avec chute de fragments, laissant souvent les armatures oxydées apparentes.

2. Les polluants générés par les cimenteries : cas de l'industrie Djouad Taher-Hamma Bouziane :

Les principaux rejets de la fabrication du ciment sont les émissions des fours. Elles sont dues aux réactions physiques et 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 (fig.03).

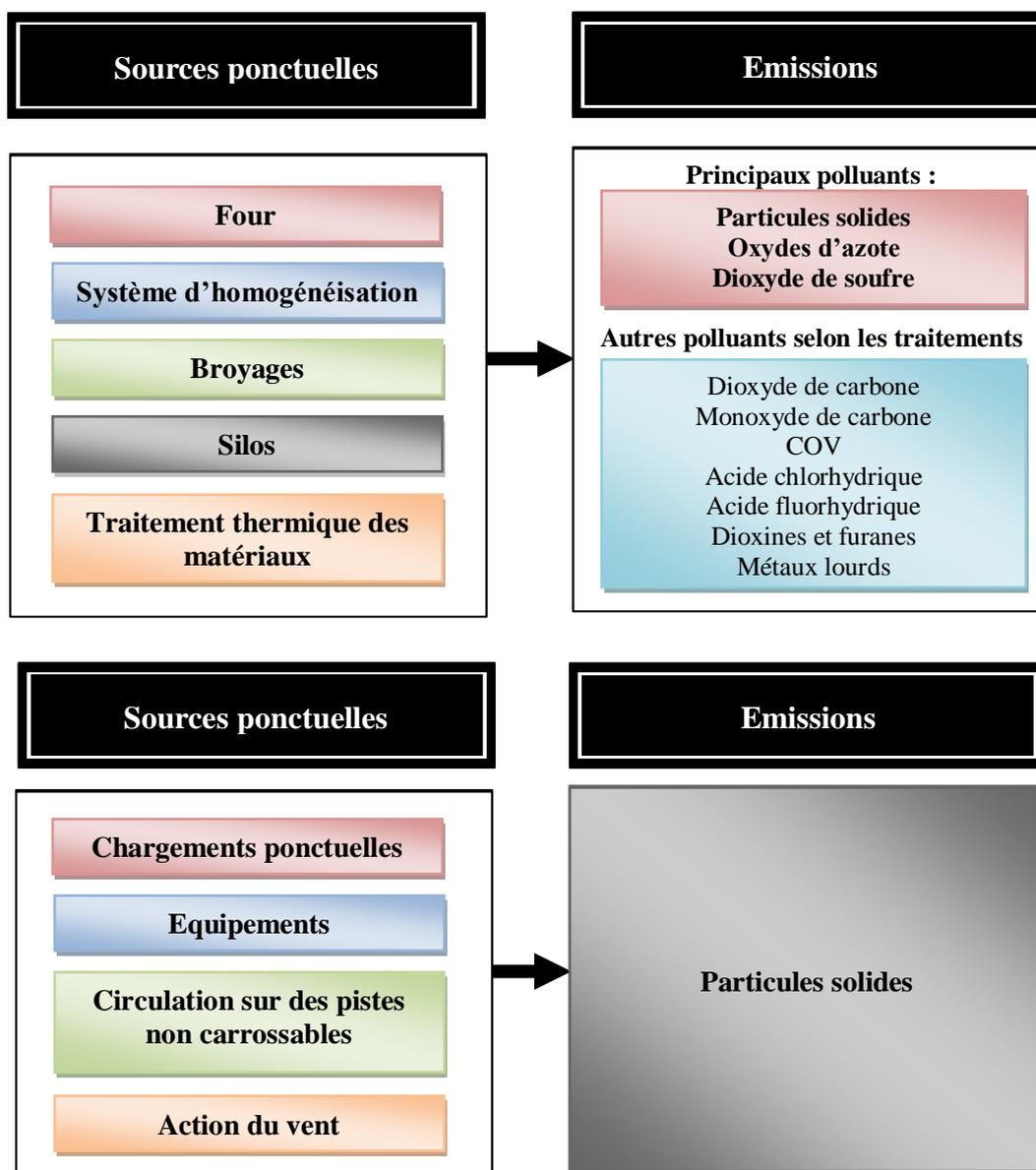


Figure 03 : Polluants atmosphériques associés à l'industrie du ciment

Pendant la cuisson des matières premières (fabrication du ciment), le carbonate de calcium est transformé en oxyde de calcium, laissant s'échapper le dioxyde de carbone (CO_2) contenu dans le calcaire. Les émissions gazeuses sont constituées du CO_2 de la décarbonatation et des effluents gazeux des combustibles, ainsi que, dans une moindre mesure, de vapeur d'eau. Elles peuvent contenir aussi des composés soufrés (en général sous forme de SO_2), de l'oxyde d'azote (NO_x), du monoxyde de carbone (CO), de poussières. Des petites quantités de COV, d'ammoniaque (NH_3), d'acide chlorhydrique (HCl) peuvent être émises.

Les principaux polluants atmosphériques émis par la cimenterie Hamma bouziane, leurs sources, ainsi que leurs effets sur la santé et l'environnement sont récapitulés dans le tableau 04 (Louadah, 2016).

Tableau 04 : Les principaux polluants émis par la cimenterie Hamma Bouziane

Polluant	Sources principales
Monoxyde de carbone (CO)	Combustion des matériaux utilisés pour chauffer le four.
Oxydes d'azote (NOx)	Combustion des matériaux utilisés pour chauffer le four.
Dioxyde de soufre (SO₂)	Combustion des matériaux utilisés pour chauffer le four.
Particules	le four, les stations de broyage des matières premières, les refroidisseurs à clinker et les broyeurs à ciment.
Dioxyde de carbone (CO₂)	La décarbonatation du calcaire Combustion des matériaux utilisés pour chauffer le four.

2.1 Les polluants gazeux :

a. Le dioxyde de soufre (SO₂) :

Le dioxyde de soufre (anhydride sulfureux) est émis principalement par la combustion au niveau du four lorsque le combustible utilisé contient lui-même du soufre (équation 1).



Une fois rejeté, le SO₂ s'oxyde en SO₃ dans l'atmosphère. En présence d'humidité, de fines gouttelettes d'acide sulfurique et de sulfates peuvent être formés (équation 2 et 3).

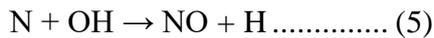
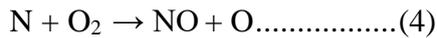


Le SO₂ est responsable de la formation des pluies acides mais aussi du phénomène de « smog acide », mélange de SO₂ et de particules dont l'impact sur la santé est très connu. Il y a lieu de rappeler que la plupart des cimenteries du pays fonctionnent au gaz naturel, ce qui réduit considérablement les émissions de SO₂.

b. Les oxydes d'azote (NOx) :

Comme pour le SO₂, les oxydes d'azote sont produits au niveau du four pendant la combustion. Leur formation est favorisée par un excès d'oxygène mais surtout par la température de la flamme qui conduit à une dissociation des molécules d'azote et d'oxygène (équations 1, 2, 3, 4 et 5).





Le NO formé peut s'oxyder dans l'atmosphère pour former en présence d'humidité de fines gouttelettes d'acide nitrique selon les équations suivantes (6, 7) :



c. Le monoxyde de carbone (CO) :

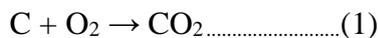
Le monoxyde de carbone est produit au niveau du four lorsque la combustion est incomplète (insuffisance d'air) ou mal réglée (équation 1)



Notons qu'au niveau d'un four fonctionnant au gaz naturel, les émissions de CO dans les gaz de combustion sont très faibles quand la combustion est complète.

d. Le dioxyde de carbone (CO₂) :

Le dioxyde de carbone se forme quand la combustion est complète, donc quand il y a suffisamment d'air (équation 1).



Du CO₂ est également rejeté durant la calcination suite à la décarbonatation du calcaire contenu dans la matière première (équation 2).



L'industrie du ciment contribue d'une manière appréciable aux émissions mondiales de CO₂ (2,4%). Le CO₂ n'est pas officiellement un polluant du fait de la généralité de son émission lors de la combustion de tous les combustibles fossiles mais son augmentation dans l'atmosphère pose le problème actuel de l'effet de serre (Ramade, 2011).

2.2 Les poussières :

La raison principale pour laquelle les émissions de poussières sont réglementées est qu'elles véhiculent des polluants qui peuvent être de nature chimique organique ou inorganique. Traditionnellement, l'émission de poussières, en particulier les rejets des cheminées des fours, a toujours été la préoccupation principale en matière d'environnement pour la fabrication de ciment. Les principales sources d'émissions de poussières au niveau de la cimenterie-Djouad Taher sont les fours, les stations de broyage des matières premières, les refroidisseurs à clinker et les broyeurs à ciment, car ce sont des équipements où circulent des volumes

importants de gaz au travers de matériaux poussiéreux. La conception et la fiabilité des filtres électrostatiques et des filtres à manches modernes permettent d'abaisser les émissions de poussières à des niveaux négligeables, inférieurs à 10 mg/m^3 dans certaines installations (Environnement Hygiène Santé-EHS, 2010). La cimenterie Hamma Bouziane s'est dotée de plusieurs filtres de type DELTA NEU, DEM100 placés à des étapes et à des endroits clés lors du processus de fabrication de ciment (plus de détails sont donné dans le chapitre 2).

3. Normes algériennes relatives à la qualité de l'air :

La qualité de l'air à l'émission générée par les industries est définie dans le décret exécutif N°06-138 du Rabie El Aouel 1427 correspondant au 15 avril 2006 réglementant l'émission dans l'atmosphère de gaz, fumées, vapeurs, particules liquides ou solide, ainsi que les conditions dans lesquelles s'exerce leur contrôle (tab. 05).

Tableau 05 : Normes algériennes de la qualité de l'air à l'émission

Paramètres	Unité	Valeurs limites	Tolérance pour les installations anciennes
Poussières	mg/Nm ³	30	50
SO ₂		500	750
NO _x		1500	1800
CO et CO ₂		150	200

Chapitre 2 : Matériel et Méthodes

1. Présentation de l'établissement d'accueil (cimenterie Hamma Bouziane) :

1.1 Historique :

La cimenterie HAMMA BOUZIANE a été créée vu le besoin en matériaux de construction. Ainsi, la Société Nationale des Matériaux de Construction (SNMC) a adopté la société française Creusot Loir en 1974 afin de compléter une nouvelle unité de production de ciment à Constantine. Les travaux ont commencé en novembre 1975 et se sont terminés en 15 juillet 1981. La production des matériaux de construction a débuté en février 1982. La réalisation de l'usine achevée a été estimée à un coût de 82.000.000 DA. En 1983, l'unité est nommée DJOUAD TAHER. En 2009, l'unité devient une filiale de la société mère avec une nouvelle appellation G.I.C.A (Groupe Industriel de Ciments d'Algérie).

Les activités de cette cimenterie sont la production et la commercialisation du ciment portant le code CPJ CEM II A42, 5N selon la norme algérienne NA 442 équivalente à la norme française NF15 301. Ce ciment portland à la Pouzzolane est obtenu par le mélange finement broyé de clinker et d'ajouts du sulfate de calcium sous forme de gypse en tant que régulateur de prise.

Conçue pour une capacité de production de un (01) million de tonnes de ciment/an, les unités commerciales sont chargées de la satisfaction des besoins en ciment des clients auto constructeurs sur les différents points de vente implantés au niveau des diverses Wilayates. La Cimenterie est entrée en activité durant l'année 1982 et n'a cessé de croître en production jusqu'à atteindre 1.200.000 Tonnes en 2016 et plus de 1.500.000 Tonnes par an actuellement. La fabrication d'une tonne du ciment nécessite : 1600 kg de matière première, 0.080 à 0.085 tonnes d'Eq de pétrole, et 90 à 110 kilowatt/heure.

La Cimenterie de Hamma Bouziane est certifiée ISO 9001V 2008 depuis 2007 et ISO 14001V2004 depuis 2016. Elle est actuellement en phase de migration vers la version 2015 des deux certificats.

1.2 Localisation :

La cimenterie se trouve sur la route nationale N°3. Elle se situe à 12 km de Constantine et à 7 km de Hamma Bouziane à une altitude de 525 m (fig. 04). Elle s'étale sur une superficie de 129 ha et est constituée d'un bâtiment administratif et de différents ateliers de production et de stockage. Les premières habitations étaient à cinq kilomètres à vol d'oiseau de l'usine, elles ne sont plus qu'à cent mètres (EHS, 2010).

Cette unité occupe un emplacement stratégique, en plus de sa proximité avec le réseau public de communications, elle est également située dans une zone riche en matières

premières, Jabal Saleh, qui est à 2 km de l'unité. Ce qui assure l'approvisionnement de la cimenterie jusqu'à 50 ans. La matière première est extraite du calcaire de 138 hectares de la carrière de Jebel Saleh.

En ce qui concerne l'énergie électrique, l'unité est alimentée par une ligne électrique d'une capacité de 60 kV. La consommation de gaz naturel est très élevée et le four de l'installation est alimenté par une conduite de gaz directe, et l'unité est alimentée par l'eau de la source de Hamma Bouziane d'une capacité de 100 m/s (EHS, 2010).

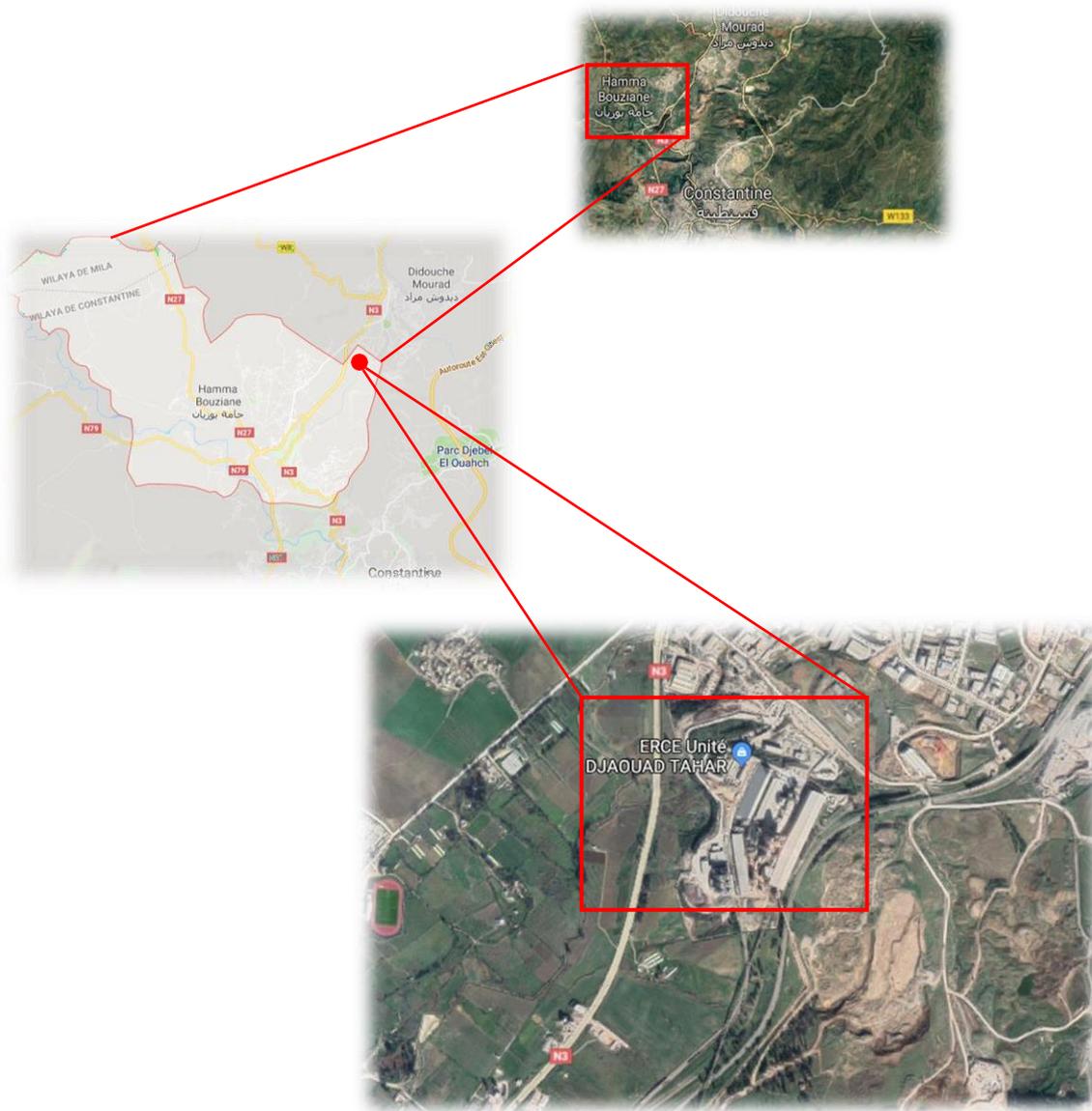


Figure 04 : Localisation géographique de la cimenterie Hamma Bouziane (Google maps)

1.3 Climat et végétation :

Le climat au niveau du groupement de Constantine a quelques particularités. En effet, la pluviométrie varie dans l'espace et dans le temps. La partie septentrionale du groupement étant la zone la plus arrosée, la pluviométrie sur les hauteurs peut atteindre jusqu'à 1200 mm. Par contre, plus on se dirige vers le Sud, plus les précipitations diminuent, on passe facilement à 500 mm. A caractère orageux, les précipitations sont irrégulièrement réparties dans l'espace et varient d'une année à l'autre. Les inondations sont constatées annuellement à travers le groupement et particulièrement au niveau de la ville de Constantine. Les températures sont marquées par des variations saisonnières. Les moyennes mensuelles observées correspondent à 2,9° C pour les minima en hiver, et 42,8°C pour les maxima en été.

La végétation est caractérisée par des petits endroits boisés, des oliviers, des céréales...etc. Le couvert végétal est presque absent sur les Djebels Salah et Kelal.

En surface, certaines zones sont cultivées (blé principalement) et d'autres ne le sont pas à cause de la nature très caillouteuse des sols.

1.4 Hydrographie :

La plaine du Hamma appartient au bassin versant d'oued El Rhumel, dont les principaux affluents, présents dans le secteur d'étude sont :

- L'oued El Hamma prenant naissance au pied du Djebel Kelal. Il est alimenté par les sources d'Ain Skhouna et Ain Hammam Zouaoui, situé au NO du Djebel Salah selon une direction SE-NO qui devient SO-NE au Nord du Hamma.
- L'oued Zied (SE de Djebel Salah) et l'oued El Annka (au NE), ont respectivement un sens d'écoulement Sud vers l'oued El Rhumel et NO vers l'oued ElHamma.

De nombreuses sources surgissent au sein des formations mio-pliocènes recouvrant les piémonts des massifs (Centre d'Etudes et de services Technologiques de l'Industrie des Matériaux de Construction-CETIM, 2016).

1.5 Organisation de la direction générale :

La cimenterie a ses propres structures (fig. 05) :

- une direction générale assistée de cinq chefs de département,
- neuf départements assumant des missions de gestion et de soutien à la production.

Il n'existe pas une structure au sein de la filiale qui a pour mission exclusivement la prise en charge des problèmes de pollution que génère l'activité. La création d'une telle structure est projetée. Son champ de compétence et ses prérogatives restent à définir. Les compétences de la structure chargée du dépolluage ont été élargies d'une façon informelle à l'environnement.

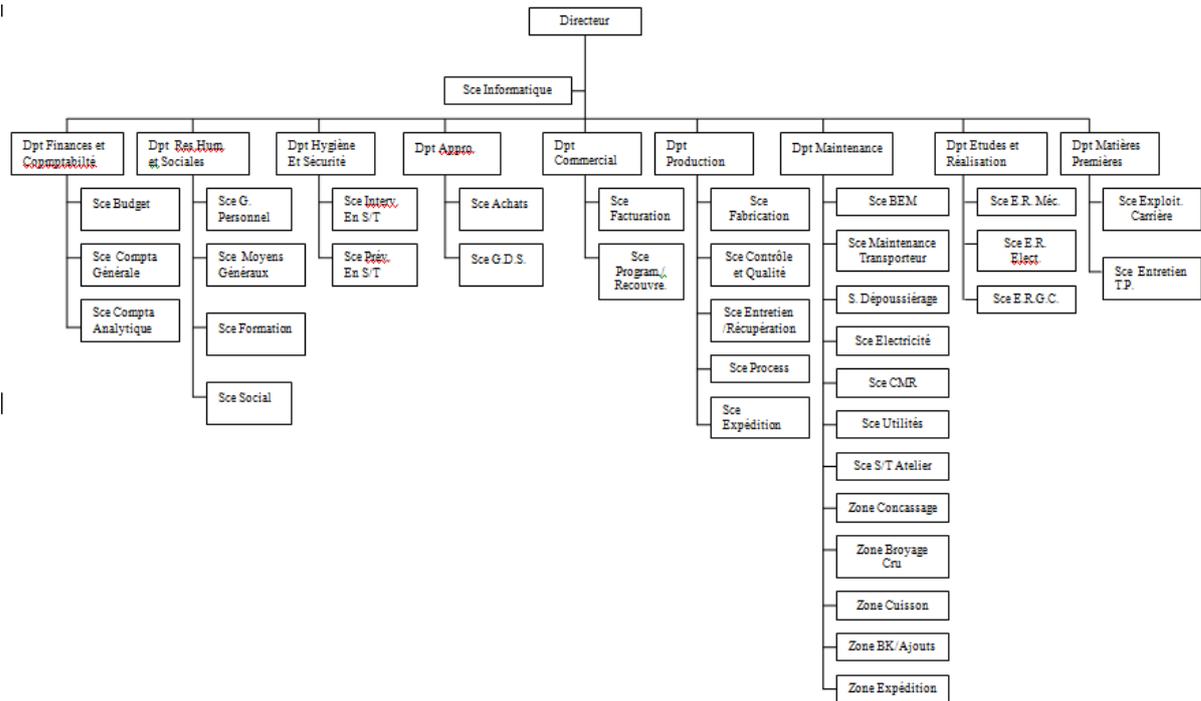


Figure 05 : Organigramme de la Cimenterie-Unité Djouad Tahar

1.6 Fabrication du ciment :

Pour fabriquer du ciment, il faut réunir quatre éléments principaux selon des dosages préétablis : la chaux, la silice, l'alumine et l'oxyde de fer. L'élément prépondérant étant le calcaire. La cimenterie est d'ailleurs implantée à proximité d'un important gisement de cette matière. L'ensemble de ces éléments, appelé cru, est ensuite traité par voie sèche. Les informations relatives au processus de fabrication du ciment au niveau de la cimenterie Hamma Bouziane décrites ci-dessous ont été obtenues à partir du site de ladite cimenterie.

1.6.1 L'extraction des matières premières :

Le calcaire et l'argile sont extraits des carrières situées à proximité des cimenteries (fig. 06).

Abattus à l'explosif, les rochers et blocs sont transportés par des tombereaux (gros

camions) vers des concasseurs afin de réduire leur taille et d'obtenir des cailloux de moins de 10 cm de diamètre. Ces matières premières font l'objet d'une sélection rigoureuse. Leur composition doit comprendre de la chaux, de la silice, de l'alumine et de l'oxyde de fer dans des proportions bien déterminées.



Figure 06 : Vue d'ensemble de la carrière de Jebel Saleh

1.6.2 La préparation du cru :

Une fois concassés, les matériaux subissent un pré-mélange dans des halls de pré-homogénéisation ce qui permet d'obtenir une plus grande régularité de composition. Ce mélange comprend : 75 % de calcaire, 12,5 % d'argile rouge, 12,5 % d'argile brune. Un deuxième mélange est effectué, il est composé de 99 % de matière première (mélange précédent) et +1 % de minerai de fer. Le tout est séché et broyé dans un broyeur (à boulets ou à galets) afin de réduire leur taille à quelques dizaines de microns. Le passage des gaz du four dans le broyeur permet le séchage de la matière (voie sèche) et une captation partielle du SO_2 de ces gaz par la matière broyée. La poudre fine alors obtenue est appelée farine crue, d'où l'expression de broyeur à cru.

1.6.3 La cuisson :

La farine est introduite sous forme de poudre dans une tour de préchauffage où elle est préalablement chauffée par les gaz produits dans le four rotatif (phase de pré-calcination). Elle descend ainsi par gravité, à contre-courant des gaz chauds du four. La tour possède plusieurs étages de cyclones, ce qui permet de faire monter la température de la farine progressivement jusqu'à 850 °C (procédé par voie-sèche). La farine sera ensuite introduite dans un four rotatif incliné garni de briques réfractaires. Le four est alimenté en chaleur par un brûleur de grande capacité. La température de flamme atteint plus de 1500 °C.

Elle subit au cours de cette cuisson des réactions chimiques complexes. Tout d'abord, le calcaire se décarbonate sous l'action de la chaleur à une température avoisinant les 900 °C et se transforme en chaux, tandis que les argiles se décomposent en silicates et aluminates. L'ensemble se recombine ensuite à une température d'environ 1500 °C en silicates et aluminates de chaux. Ce processus chimique conduit ainsi à l'obtention d'un produit semi-fini appelé clinker, qui possède des propriétés de liant hydraulique (fig. 07).

Le clinker est ensuite convoyé au travers du refroidisseur dans lequel il restitue une bonne partie de son énergie thermique et est refroidi par soufflage d'air à une température de 100 °C.

La composition chimique et l'homogénéité de la matière en entrée du four, ainsi que sa régularité dans le temps, sont des éléments fondamentaux dans la conduite du processus de production. Le four possède des filtres à manches qui permettent de filtrer les poussières, limitant les rejets dans l'environnement.



Figure 07 : Aspect du produit semi fini clinker

1.6.4 L'obtention du ciment :

Le clinker est stocké dans des halls (ou silos) puis, lors d'une nouvelle étape de broyage, passé dans des broyeurs à boulets (ou à galets) dont la rotation provoque, par chocs et écrasement, la réduction en grains particulièrement fins. La poudre obtenue de moins de 60 microns, est appelée ciment. Du gypse est ajouté afin de régulariser le temps de prise du ciment. Des compléments peuvent être faits : du filler de calcaire, des cendres volantes (issues de la combustion du charbon dans les centrales thermiques) pour améliorer l'ouvrabilité et la consistance, des laitiers de haut-fourneau (sous-produits des aciéries), ou des pouzzolanes naturelles ou artificielles pour améliorer les propriétés hydrauliques. Le ciment enfin obtenu est stocké dans des silos de plusieurs milliers de tonnes, parfois divisés en compartiments permettant la conservation de plusieurs qualités de ciment. Il est

ensuite livré en vrac ou en sac. Pour la livraison en vrac, les camions-citernes sont placés sur un pont bascule et remplis à l'aide de manches télescopiques situées à la base des silos. Le remplissage est contrôlé et les données nécessaires à l'établissement des documents d'expédition et de facturation sont transmises à l'ordinateur central. Quand à l'ensachage du ciment (la livraison en sacs), il s'effectue sur des machines dans des sacs de 50 kg. Un récapitulatif des différentes étapes du processus de fabrication du ciment est illustré par la figure 08.

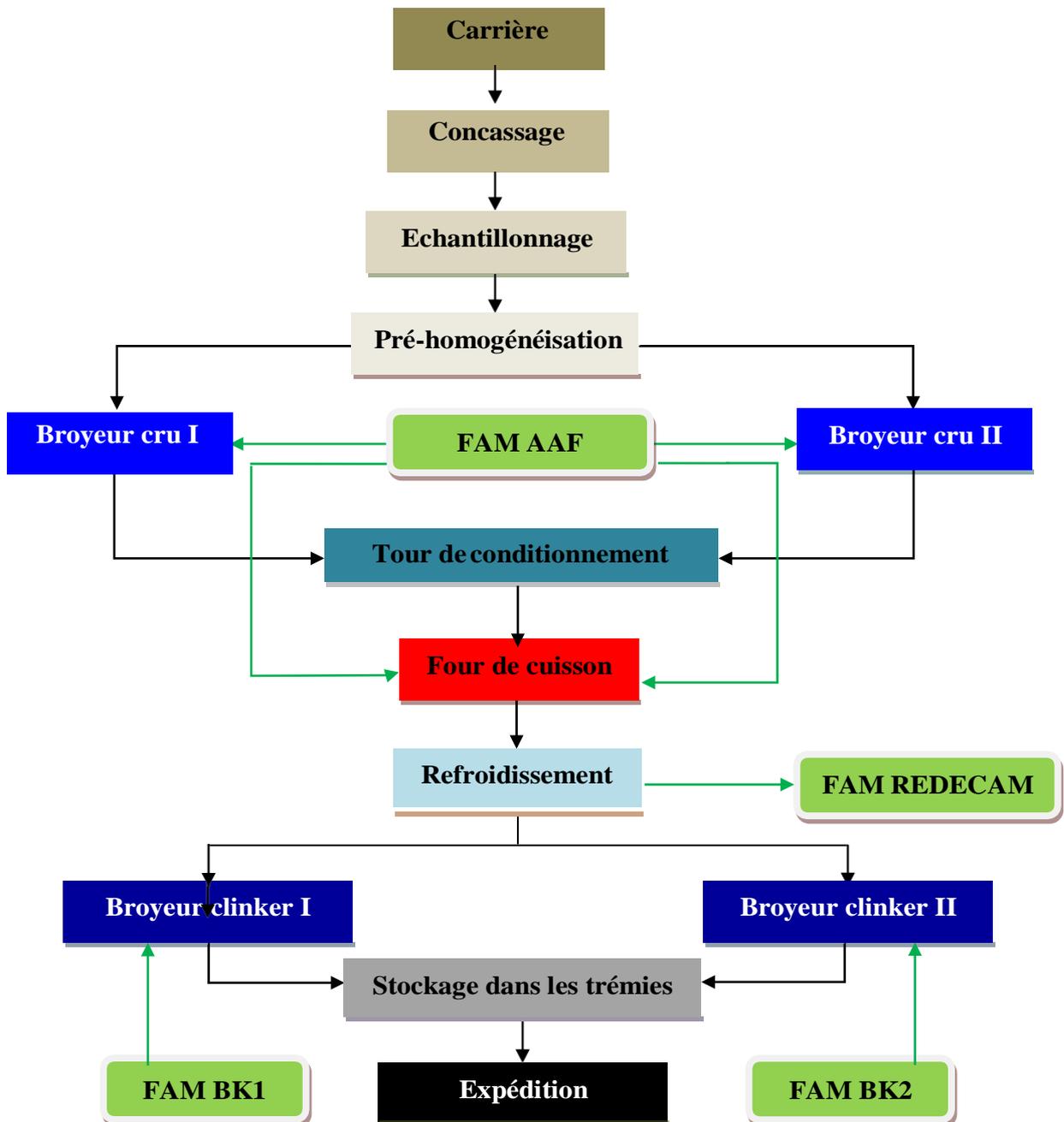


Figure 08 : Plan d'organisation des ateliers et emplacement des filtres au niveau de la cimenterie Hamma Bouziane

2. Durée et lieu du stage :

Notre stage a été effectué au niveau de la cimenterie Hamma Bouziane nommée Djouad Taher et a duré deux mois (Février 2019-Mars 2019). Notons que la caractérisation des rejets de ladite industrie a porté sur des mesures effectuées durant la période allant du mois de septembre 2018 au mois de mars 2019 selon le calendrier décrit dans la figure 09.

Ce stage était une occasion pour nous de découvrir le monde de l'entreprise et ses enjeux.

La fabrication du ciment est un processus polluant malgré la nécessité absolue de ce matériau pour la vie sociale et économique, et la grande importance que lui accorde le monde entier. Nous avons visité successivement cette cimenterie durant plusieurs semaines, avec comme objectif la découverte des étapes de fabrication du ciment, en premier lieu, était nécessaire et de très grand intérêt. Beaucoup de processus ont été alors découverts, tels que la décarbonatation du calcaire (phénomène chimique) qui est la principale cause des émissions importantes du gaz carbonique par les cimenteries, ainsi que la cuisson des matières premières à des températures élevées (plus de 1500 °C), et le broyage du clinker, qui sont à l'origine de la grande consommation énergétique pour la fabrication du ciment. Ce stage nous a aussi permis de connaître le matériel utilisé pour la surveillance de gaz à effet de serre et des poussières émis par ladite industrie.

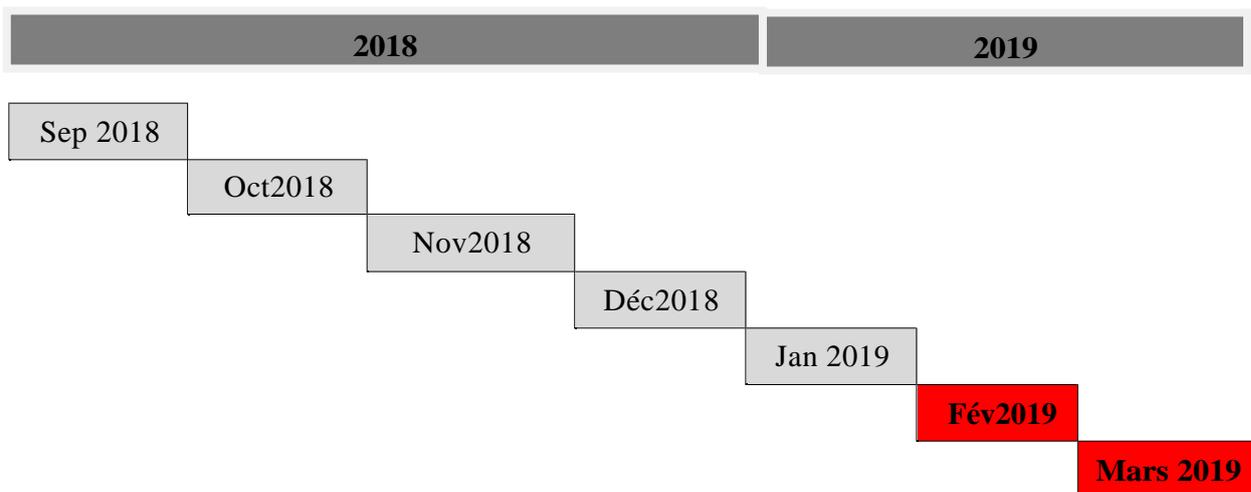


Figure 09 : Calendrier de la caractérisation des rejets de la cimenterie Hamma Bouziane

3. Rythme et nature des mesures :

La mesure en continu des émissions des cimenteries impose l'utilisation de systèmes de mesure et de reporting, conçus pour fonctionner 24h/24 avec rapidité, *in situ* (situé à la

source d'émission). La surveillance des gaz à effet de serre est effectuée dans des conditions environnementales particulièrement sévères. Fiabilité, robustesse et réduction des opérations de maintenance sont les objectifs du développement d'une gamme complète d'analyseurs de fumée (gaz et poussières) qui sert à analyser les principaux constituants de l'échantillon gazeux. Dans le cadre de cette étude et compte tenu de la nature des activités de l'industrie en question, les polluants auxquels nous nous sommes intéressés sont : NO_x, CO, CO₂, SO₂, O₂ et les poussières. Les gaz (NO_x, CO₂, SO₂, O₂, CO) sont choisis parce qu'ils ont les caractéristiques d'un type de pollutions industrielles et parce que leurs effets nuisibles pour l'environnement et/ou la santé sont déterminés.

Pour ce qui est de la fréquence des mesures, des lectures horaires tirées des graphes et des tableaux du logiciel sont effectuées. Ces dernières serviront pour le calcul des moyennes journalières, puis mensuelles pour chacun des polluants mesurés pour les mois de septembre, octobre, novembre, décembre, janvier, février et mars. Notons que l'usine était en arrêt durant la période allant du 15 janvier 2019 au 13 février 2019 pour des travaux de maintenance, et donc pour ces deux mois la moyenne a été calculée pour 15 jours au lieu de 30 et 28.

Les concentrations des gaz obtenus sont exprimées en ppm pour NO_x et en % pour CO et O₂. La conversion de ces valeurs en mg/Nm³ est effectuée selon les formules suivantes :

- Pour les NO_x :

$$1 \text{ ppm (NO}_x\text{)} * 2.05 = 2.05 \text{ mg/Nm}^3$$

- Pour le CO :

$$1 \% \text{ de CO} = 0.0001 \text{ ppm et } 1 \text{ ppm (CO)} = 1.25 \text{ mg/Nm}^3$$

4. Description des systèmes d'analyse des gaz :

Dans le cadre de la réglementation algérienne, qui vise à réduire l'émission des gaz dans l'atmosphère et la préservation de l'environnement, la cimenterie Hamma Bouziane a installé des analyseurs de gaz de marque SIEMENS, qui sont réputés pour leurs qualités, leur fiabilité et leurs précisions de mesure, au niveau des unités de productions de ciments pour le contrôle des gaz émis à travers les cheminées dans l'atmosphère.

Au niveau de cette industrie, la mesure des différents polluants est effectuée en utilisant des analyseurs de gaz. Ces derniers permettent une analyse en continu des différents polluants. La procédure de mesure des gaz se caractérise par un prélèvement de l'échantillon à analyser à partir de la cheminée de la tour finale, cet échantillon est amené à

l'analyseur à travers une sonde de prélèvement, une conduite d'échantillon (ligne chauffée) et un dispositif de préparation de l'échantillon. Les gaz à mesurer doivent arriver à l'analyseur exempt de poussières. La formation de condensât doit être évitée dans les cellules de mesure. C'est pourquoi les mesures appropriées requièrent une préparation de gaz. Cette préparation des échantillons permet d'ajuster par exemple la pression, la température et le débit et si nécessaire de débarrasser le gaz de mesure de la poussière et de l'humidité. On est ainsi assuré que la mesure est effectuée dans des conditions bien définies (fig. 10).

Dans le cadre de cette étude, les analyseurs utilisés sont :

- **ULTRAMAT 23** : permet de contrôler les trois gaz (NO_x , CO , O_2). L'absorption spécifique des molécules de bandes du rayonnement infrarouge sur la base du procédé monofaisceau est le principe de mesure de cet analyseur.
- **OXYMAT 61** : permet de contrôler et mesurer (O_2), en utilisant le principe de paramagnétisme.
- **Testo 350** : pour les taux en SO_2 ,
- **DELTA NEU, DEM100** : pour la quantification de la poussière.

L'accès à distance aux appareils et aux systèmes d'acquisition de données et logiciels d'avant-garde pour la surveillance en continu des émissions des cheminées industrielles et des process est possible en ligne *via* l'unité de diagnostic en consultant rapidement l'écran. Un ordinateur sous Windows XP héberge le programme d'acquisition des données. Il est écrit en langage graphique et la visualisation du tableau sous le logiciel YOUR LOGO HERE ltd.

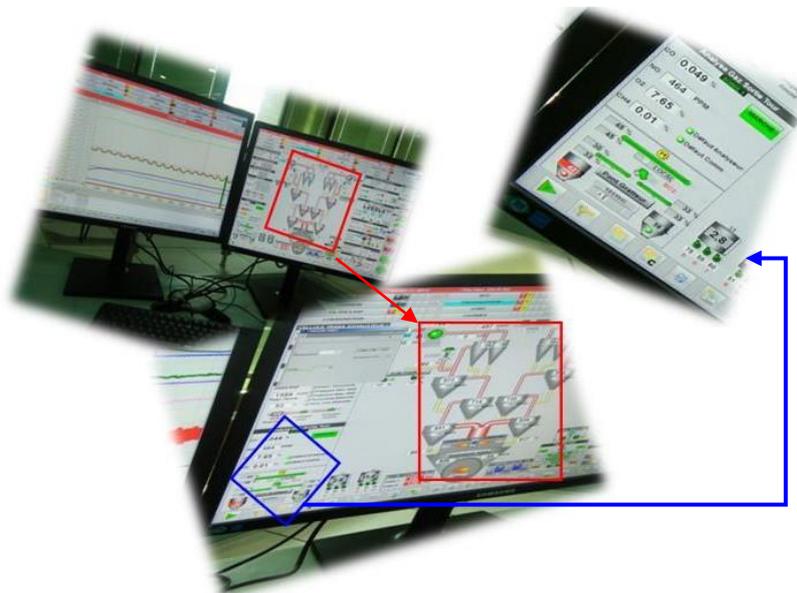


Figure 10 : Système de contrôle des mesures de gaz

4.1 Description du système d'analyse des gaz OXYMAT 61 :

L'analyseur de gaz OXYMAT 61 (fig. 11) fonctionne d'après le principe paramagnétique et permet, à partir d'une valeur de pression différentielle, de déterminer la concentration d'oxygène dans le gaz à mesurer. Plus de détails sur le principe de fonctionnement de cet analyseur sont donnés dans l'annexe 01.

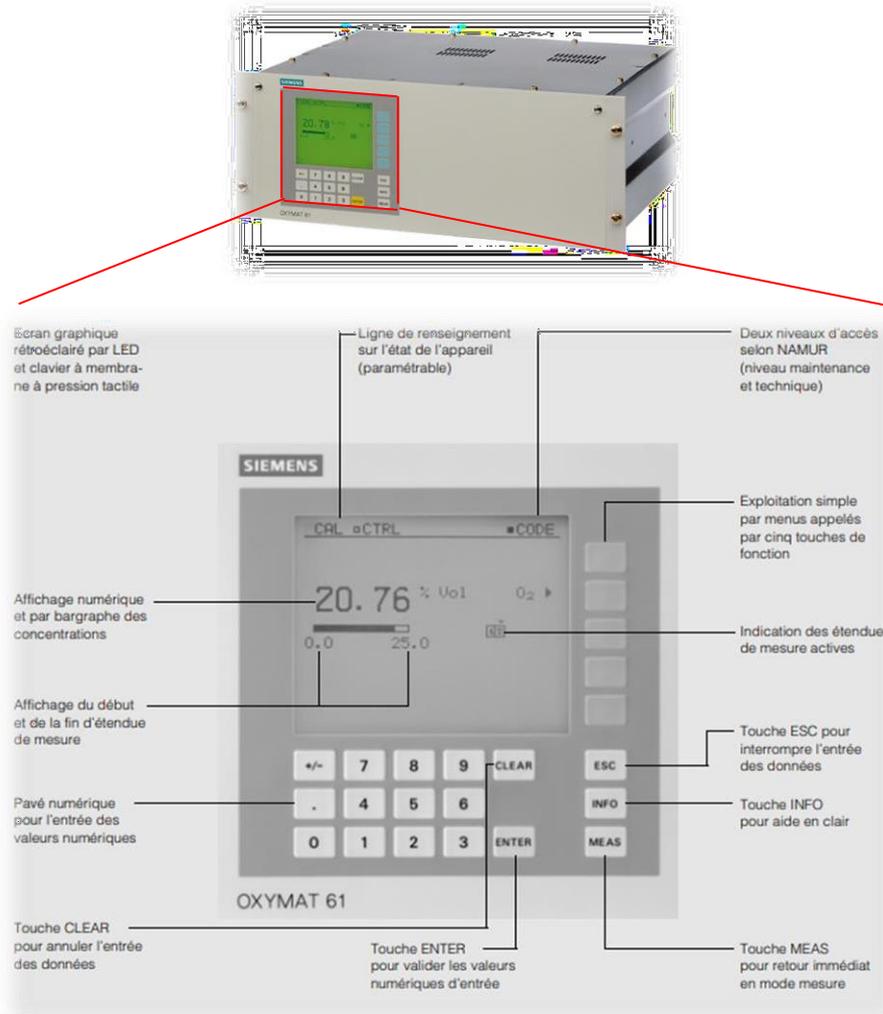


Figure 11 : OXYMAT 61, description du clavier à membrane et de l'écran graphique

4.2 Description du système d'analyse des gaz ULTRAMAT 23 :

Le Siemens ULTRAMAT 23 (fig. 12) est un analyseur à plusieurs composants pour une mesure qui peut aller jusqu'à 3 gaz sensibles à l'absorption infrarouges, ainsi que l'oxygène avec une cellule électrochimique ou paramagnétique. Il est adapté à un large éventail d'applications standard, telles que la surveillance des émissions, l'optimisation de la combustion, la surveillance de l'air ambiant et d'autres applications. L'étalonnage à l'aide de l'air ambiant élimine la nécessité d'utiliser des gaz d'étalonnage pour une période

prolongée (jusqu'à un an). Plus de détails sur le principe de fonctionnement de cet analyseur sont donnés dans l'annexe 02.

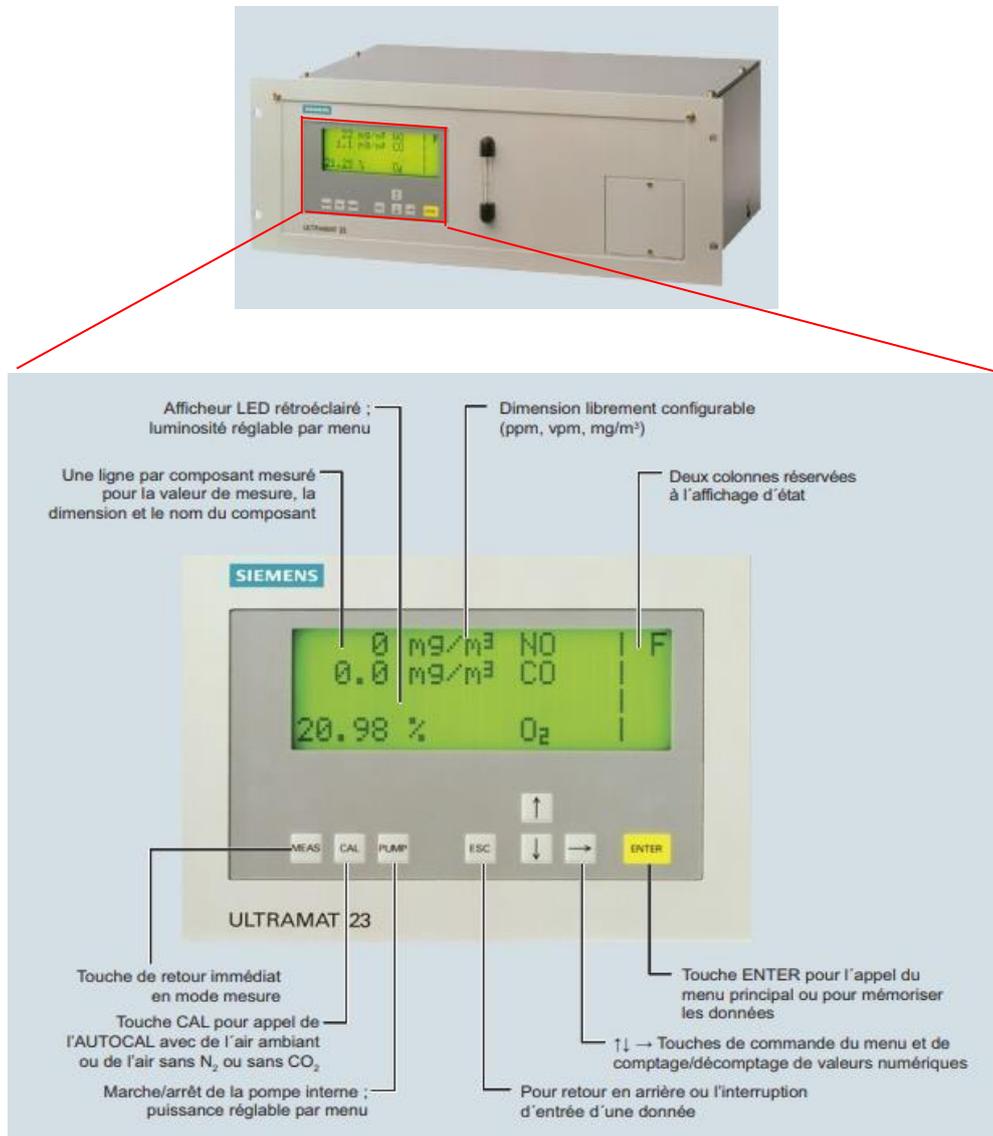


Figure 12 : ULTRAMAT 23, description du clavier à membrane et afficheur graphique

4.3 Estimation des émissions du dioxyde de carbone (CO₂) :

Contrairement aux gaz précédents (NO_x, CO, O₂), les concentrations de CO₂ émis dans l'atmosphère ne sont pas mesurées mais elles sont calculées. Les concentrations en CO₂ émises dans l'atmosphère proviennent essentiellement du procédé de décarbonatation et la combustion du clinker. La formule qui permet le calcul du taux de CO₂ et la suivante :

$$E_{CO_2} = (Q_{gaz} * FE_{combustion}) / Q_{kk} + FE_{décarbonatation}$$

Où :

- Eco₂ : Emission de CO₂ (kg CO₂/tonne kk)
- Qgaz : Quantité de gaz consommé en thermie (1 thermie = 1.16 kwh), elle est variable (tab. 06)
- Qkk : Production du clinker (T), elle est variable (tab. 06)
- FE combustion : Facteur d'émission de combustion (tonne CO₂/Mwh) = 0.1849192
- FE décarbonatation : Facteur d'émission de décarbonatation (kg CO₂/tonne kk) = 527

Tableau 06 : Quantité de gaz consommé et production de clinker
(Sept 2018-Mar2019)

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar
Gaz (1000 kwh)	93000.7	112464.3	100715.8	100510.5	42392.2	58017.8	105130.8
Production kk (T)	75813	71700	80011	93352	33812	37560	88367

5. Analyse des émissions en SO₂ et en poussières :

La surveillance des émissions en SO₂ et en poussières générées par la cimenterie Hamma Bouziane est assurée par le Centre d'Etude et de services Technologiques de l'Industrie de Matériaux de construction (CETIM) qui est une filiale du Groupe Industriel des Ciments d'Algérie GICA. Ainsi, chaque trois mois une équipe se déplace sur site et procède aux analyses et mesures de gaz à l'émission et taux de poussière à la source. Les systèmes de mesure utilisée par le CETIM sont :

- **Testo 350** : pour les taux en SO₂,
- **DELTA NEU, DEM100** : pour la quantification de la poussière.

Les lieux ciblés pour effectuer les mesurer (*cf.1.6. Fabrication du ciment, figure 08*) sont :

- Le filtre de la cheminée AAF pour la mesure des émissions en SO₂,
- Les filtres BK1, BK2, cheminée de AAF, et cheminée du refroidisseur REDECAM pour les mesures des taux de poussière à la source.

5.1 Description du système d'analyse des gaz testo 350 :

Le testo 350 est un système de mesure portable et flexible, idéal pour des analyses de combustion professionnelles et la mesure des gaz de combustion industriels. Il se compose de trois unités :

- **Unité de contrôle** : est une unité de commande permettant d'afficher les valeurs de mesure et de commander le coffret d'analyse, son écran graphique détaillé permet de gérer les analyses de combustion de gaz,
- **Le coffret d'analyse (appareil de mesure)** : la liaison entre l'unité de contrôle et le coffret d'analyse se fait *via* des contacts à fiche, *via* un câble de données ou *via* Bluetooth,
- **La sonde de prélèvement** : chauffée ou non, la sonde de prélèvement de gaz industriel est utilisée pour la mesure à température élevée, dans des environnements très poussiéreux ou lorsque les gaz d'échappements sont humides.



Figure 13 : Appareil de mesure des émissions de SO₂-Testo 350

5.2 Les appareils d'analyses des rejets de poussières-Dust Emission Monitor (DEM100) :

C'est un appareil installé sur les cheminées en aval des dépoussiéreurs. Il permet de mesurer, contrôler et surveiller en continu les rejets des poussières des installations. Son principe de fonctionnement repose sur la tribo-électricité : les particules en suspension provoquent de l'électricité statique par impact sur une sonde induisant un courant de faible intensité, plus les particules sont nombreuses, plus le courant est élevé. Les mesures sont instantanées et/ou programmable sur une période bien déterminée.



Figure 14 : Appareil de contrôle des rejets de poussières-DEM100

6. Traitement des données :

Pour mieux apprécier les différents résultats obtenus, nous avons calculé pour l'ensemble des paramètres étudiés : la moyenne, les valeurs extrêmes (min et max) et l'écart type. Par ailleurs et pour mieux visualiser les mesures effectuées, nous avons opté pour la représentation graphique de type histogrammes.

Chapitre 3 : Résultats et discussion

Le tableau ci-dessous (tab. 07) représente l'évolution temporelle des paramètres pris en considération lors de la caractérisation des rejets gazeux de la cimenterie Hamma Bouziane durant la période allant du mois de septembre 2018 au mois de mars 2019. Sont indiqués : les valeurs extrêmes, les moyennes et les écartypes mensuels ainsi que les moyennes et les écartypes pour toute la période de surveillance. Sur ce même tableau figurent les normes nationales fixées dans l'article 3 du Décret exécutif n°06-138 du 5 avril 2006 réglementant l'émission dans l'atmosphère de gaz, fumées, vapeurs, particules liquides ou solides, ainsi que les conditions dans les quelles s'exerce leur contrôle. Ce même décret, en prenant en considération l'ancienneté des installations industrielles, précise les limites des valeurs de tolérance pour les rejets atmosphériques émanant de ces installations en attendant la mise à niveau des installations industrielles anciennes dans un délai de cinq ans.

Tableau 07 : Données statistiques des paramètres mesurés (Sept 2018-Mar 2019)

Mois	NO _x (mg/Nm ³)	CO (mg/Nm ³)	O ₂ (%)	CO ₂	
				Kg/tonnekk	mg/Nm ⁵
Septembre	[949.15-2039.75] 1402.12± 277.75	[250-1250] 812.5±237.5	[6.9-15.01] 9.39±1.89	753.84	376.9
Octobre	[1074.2-2310.35] 1553.19±255.14	[750-1750] 1250±200	[5.3-10.8] 8.10±1.75	817.05	408.5
Novembre	[311.6-1736.35] 1127.14±306.79	[250-1375] 1012.5±262.5	[5.3-11.3] 7.68±1.57	759.77	379.8
Décembre	[664.2-1845] 1416.88±268.95	[250-2850] 1012.5±287.5	[5.2-9.3] 6.91±1.10	546.90	273.4
Janvier	[938.9-1735.8] 1474.68±210.36	[0-1375] 1050±337.5	[5-8.2] 6.51±0.97	758.78	379.4
Février	[1047-1381.7] 1182.59±98.97	[375-1125] 750±237.5	[6.3-8.8] 7.48±0.81	812.68	406.3
Mars	[850.75-1726.1] 1411.01±204.74	[375-1375] 862.5±287.5	[7.7-8.9] 8.12±0.43	746.99	373.5
Moyenne	1366,52	964,28	7,74	742,29	371.1
Ecart type	231.82	264.28	1.22	220.41	110.2
Normes nationales décret exécutif n°06-138 (JORA, 2006)					
Valeurs limites (mg/Nm³)	1500	150	-	-	150
Tolérance pour les installations anciennes	1800	200	-	-	200
Normes internationales (d'après Wagner & Partner, 2000)					
Pays	NO_x (mg/Nm³)	SO₂ (mg/Nm³)	CO (mg/Nm³)	Poussières (mg/Nm³)	
Allemagne	500-800	400	-	-	
Finlande	1200-1800	150-400	-	-	
Espagne	1300-1800	600	-	-	
Italie	800	600	-	-	
Tunisie*	800-1200	400	-	20	

Journal Officiel de la République Tunisienne-JORT (2010).

1. Les émissions en NOx :

Les variations des concentrations moyennes en NOx émises par la cimenterie Hamma Bouziane durant la période allant du mois de septembre 2018 au mois de mars 2019 sont représentées dans le tableau 07 et illustrées par la figure 15.

L'examen de la figure 15 et du tableau 07 montre que les concentrations en NOx oscillent entre 1127,18 mg/Nm³ et 1553,192 mg/Nm³ enregistrées aux mois de novembre et octobre respectivement. La moyenne durant toute la période de surveillance est de l'ordre de 1366,52±231,82 mg/Nm³.

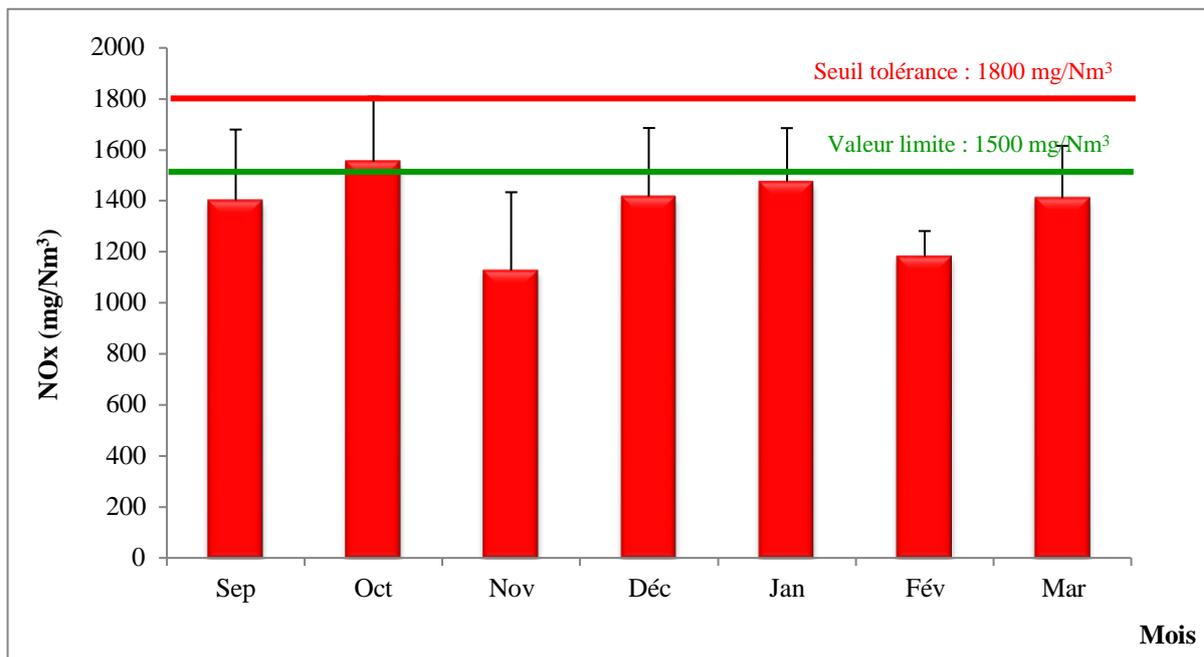


Figure 15 : Variations temporelles des émissions moyennes en NOx (Sept 2018-Mars 2019)

Les NOx se forment soit lors de la combustion dans la zone de clinkérisation, soit dans les zones de calcination ou précalcination. La fabrication de ciments très réactifs nécessite un clinker à plus fort niveau de saturation, ce qui rend la cuisson plus difficile et produit des émissions en NOx plus élevées. Ces paramètres doivent être pris en considération pour comprendre la variation des résultats obtenus (Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques-INERIS, 2010). Plus de 95% des NOx mesurés au niveau des cheminées sont des NO (Allemand, 2003). Les NO₂ sont fréquemment présents dans les cimenteries mais à des concentrations très faibles et leurs émissions ne sont pas significatives. Au niveau des cimenteries, la quantité de NOx qui y est produite dépend de la température, la teneur en oxygène (facteur d'excès d'air), la durée de la réaction, la réactivité et la teneur en azote du combustible, la présence d'humidité, le procédé de cuisson et l'équipement du four (INERIS, 2010).

Le NO₂ est le seul oxyde d'azote réglementé par les normes algériennes de la qualité de l'air ambiant. Le NO réagit rapidement avec l'ozone (O₃) présent dans le milieu atmosphérique et plus lentement avec l'oxygène de l'air pour former, dans les deux cas, du NO₂.

En matière de réglementation, le décret exécutif n°06-138 (JORA, 2006) préconise une valeur limite de l'ordre de 1500 mg/Nm³ et une tolérance des valeurs limites pour les installations anciennes de l'ordre de 1800 mg/Nm³. La comparaison de nos résultats à ces normes montre que ces valeurs limites sont dans l'ensemble respectées. Le pic enregistré au mois d'octobre (1553.19 mg/Nm³) dépasse la valeur limite mais reste inférieur au seuil de tolérance.

En Europe, dans le monde industriel, les valeurs limites d'émissions sont en cours de révision. Elles étaient jusqu'à fin 2005 de 1200 à 1800 mg/Nm³ et seront ramenées à 800 mg/Nm³ (Commission européenne, 2000). Il est à signaler que plusieurs pays dans le monde, européens principalement, ont investi ces dernières décennies dans des installations de réduction des émissions de NO_x. Ce seuil (800 mg/Nm³) a déjà été atteint en Allemagne et en Italie et ce depuis l'année 2000 (tab. 07). Les installations adoptées par quelques pays de l'union européenne permettront de réduire l'impact de l'utilisation accrue de combustibles de substitution. Une réduction des taux de NO_x peut être obtenue grâce à des procédés catalytiques avec apport d'ammoniac (Nguyen, 2013). Un exemple sur les émissions de l'oxyde d'azote ramenées à la tonne de clinker produite dans les cimenteries en Belgique (de 2001 à 2005) dont les données comprenant les émissions du four à clinker et des autres installations (broyeurs, sécheur,...etc.), les émissions de NO_x ont diminué de 10% entre 2001 et 2005 (Jasienski, 2014).

2. Les émissions en CO :

Les variations des concentrations moyennes en CO émises par la cimenterie Hamma Bouziane durant la période allant du mois de septembre 2018 au mois de mars 2019 sont représentées dans le tableau 07 et illustrées par la figure 16.

L'examen de la figure 16 et du tableau 07, montre que les concentrations en CO oscillent entre 750 mg/Nm³ enregistrées au mois de février 2018 et 1250 mg/Nm³ enregistrées au mois d'octobre 2019. La moyenne durant toute la période de surveillance est de l'ordre de 964.28±264.28 mg/Nm³.

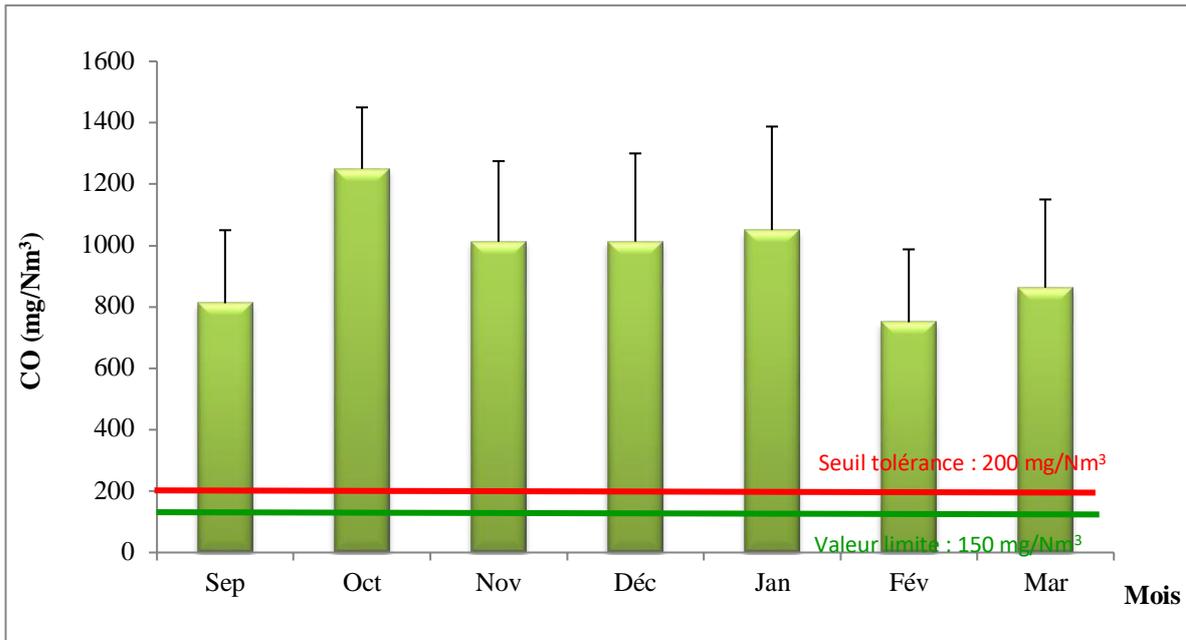


Figure 16 : Variations temporelles des émissions moyennes en CO (Sept 2018-Mars 2019)

Comme pour le NO_2 , l'émission du CO dans l'atmosphère est réglementée aussi. Le décret exécutif n°06-138 (JORA, 2006) préconise une valeur limite de l'ordre de 150 mg/Nm^3 et une tolérance des valeurs limites pour les installations anciennes de l'ordre de 200 mg/Nm^3 . La comparaison de nos résultats à ces normes, montre que les mesures en CO effectuées au niveau de la cheminée dépassent aussi bien la valeur limite que le seuil de tolérance. L'émission de CO dépend de la teneur en matières organiques des matières premières mais elle peut aussi être due à la mauvaise qualité de la combustion provoquée par une mauvaise régulation du système d'alimentation en combustibles. Les matières premières mises en œuvre par le procédé apportent de 1,5 à 6 g de carbone par kg de clinker, selon la nature du terrain d'où elles proviennent. Les résultats d'essais effectués sur des crus de différentes provenances ont montré que 85 à 95 % des composés organiques des matières premières étaient convertis en CO_2 dans un milieu contenant 3 % d'oxygène, mais que dans le même temps, 5 à 15 % étaient transformés en CO. La concentration en CO peut dépasser les 2000 mg/Nm^3 dans certains cas, avec certaines matières premières (Cembureau, 1999).

Il est indispensable de maîtriser les niveaux de CO dans les fours à ciment si les poussières sont collectées dans des filtres électrostatiques, afin de s'assurer que les concentrations demeurent très inférieures à la limite inférieure d'explosivité. Si le niveau de CO dans le filtre augmente (concentration : 0,8 % en volume) l'alimentation électrique est coupée sur déclenchement de la sécurité "pics de CO" pour éliminer le risque d'explosion, ce qui

provoque le rejet hors du four de grandes quantités de poussières non traitées (Commission européenne, 2010).

Par ailleurs, il convient de signaler qu'une augmentation du taux d'émission de CO coïncide avec une diminution des émissions de NOx (Commission Européenne, 2010). Une telle situation a justement été enregistrée pour ladite cimenterie. En effet, nous avons enregistrés des taux de NOx à l'émission relativement faibles contrairement aux taux de CO qui sont 6.5 supérieurs à la norme. La concentration en CO augmente quand la quantité d'oxygène augmente, ce qui engendre une accélération de la réaction de réduction du NO, dont N₂O est un des produits (Commission Européenne, 2010). Cette concentration plus importante de CO va améliorer la réaction de réduction du NO avec le solide carboné. De plus, cette réaction va produire du CO qui vient s'ajouter à celui déjà présent. Le NO va participer à des réactions avec le solide carboné : il est réduit pour former du N₂, du CO et du CO₂. Il s'agit d'une réaction importante dans les mécanismes de destruction du NO. Le même type de réaction se produit avec le N₂O (Commandre, 2002). Cette relation entre le NO et le CO a été étudiée par Chan et al. (1983). En effet, ces auteurs ont réalisé des expériences entre 600 et 800 °C et pour différentes concentrations de NO et de CO, et ont noté que lorsque le rapport CO/NO augmente, la réduction du NO augmente.

3. Les émissions en O₂ :

Les variations des concentrations moyennes en O₂ émises par la cimenterie de Hamma Bouziane durant la période allant du mois de septembre 2018 au mois de mars 2019 sont représentées dans le tableau 07 et illustrées par la figure 17.

L'examen de la figure 17 et du tableau 07 montre que les concentrations en O₂ oscillent entre 6.51 % enregistrées au mois de janvier et 9,39 % enregistrées au mois de septembre. La moyenne durant toute la période de surveillance est de l'ordre de 7.74 % ± 1.22 %.

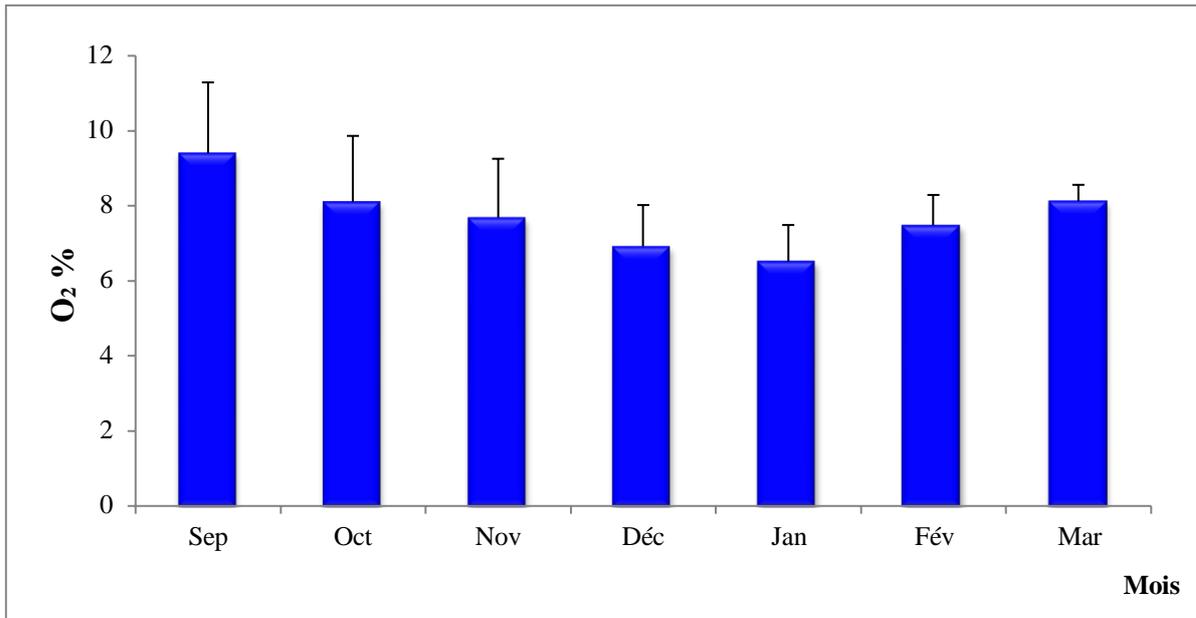


Figure 17 : Variations temporelles des émissions moyennes en O₂ (Sept 2018-Mars 2019)

Contrairement aux NO_x et CO, les émissions en oxygène ne sont pas réglementées sur le plan national. Ainsi, nous ne pouvons conclure quant aux taux enregistrés.

Par ailleurs, il est à noter que les principaux rejets de la fabrication du ciment sont les émissions atmosphériques des fours. Elles sont dues aux réactions physiques et chimiques des matières premières et à la combustion des matériaux utilisés pour chauffer les fours. Parmi les principaux constituants des gaz résiduels d'un four à ciment, l'excès d'oxygène. Cet excès d'oxygène peut contribuer à la formation des NO_x. En effet, l'azote peut se combiner avec l'oxygène à plus ou moins haute température pour former le monoxyde d'azote. L'influence de la présence de l'excès d'oxygène sur la réaction NO-C a été examinée par Chambrion et al. (1998). Ils ont introduit entre 0 et 0,4 % d'O₂ et 0,05 % de NO dans un réacteur lit fixe avec combustible. Ils ont constaté que plus la concentration en oxygène est élevée, plus le taux de formation de N₂ est grand. Ils ont remarqué également qu'en présence de 0,2 % d'O₂, la réduction du NO est augmentée. Ils proposent l'explication suivante à ce phénomène : l'idée est basée sur l'adsorption de l'azote du NO à la surface du solide carboné. Cet azote adsorbé réagirait par la suite avec l'O₂ pour former NO et N₂, et avec NO pour produire N₂ et N₂O. L'impact de la concentration en O₂ sur les émissions de NO et N₂O a été observé par Tullin et al. (1993). Ces auteurs ont constaté une diminution des émissions de NO et une augmentation des émissions de N₂O quand la concentration en oxygène augmente. Ceci pourrait expliquer en partie les faibles concentrations en NO_x enregistrées lors de cette étude.

4. Les émissions en CO₂ :

Les émissions mensuelles moyennes en CO₂ de la cimenterie Hamma Bouziane enregistrées durant la période allant du mois de septembre 2018 au mois de mars 2019, sont récapitulées dans le tableau 07 et illustrées par la figure 18. L'examen de ces derniers montre que les concentrations en CO₂ oscillent entre 546.9 kg CO₂/tonne kk (273.45 mg/Nm³) et 817.05 kg CO₂/tonne kk (408.52 mg/Nm³) enregistrées au mois de décembre et octobre respectivement. La moyenne durant toute la période de surveillance est de l'ordre de 742.29 kg CO₂/tonne kk (371.14 mg/Nm³).

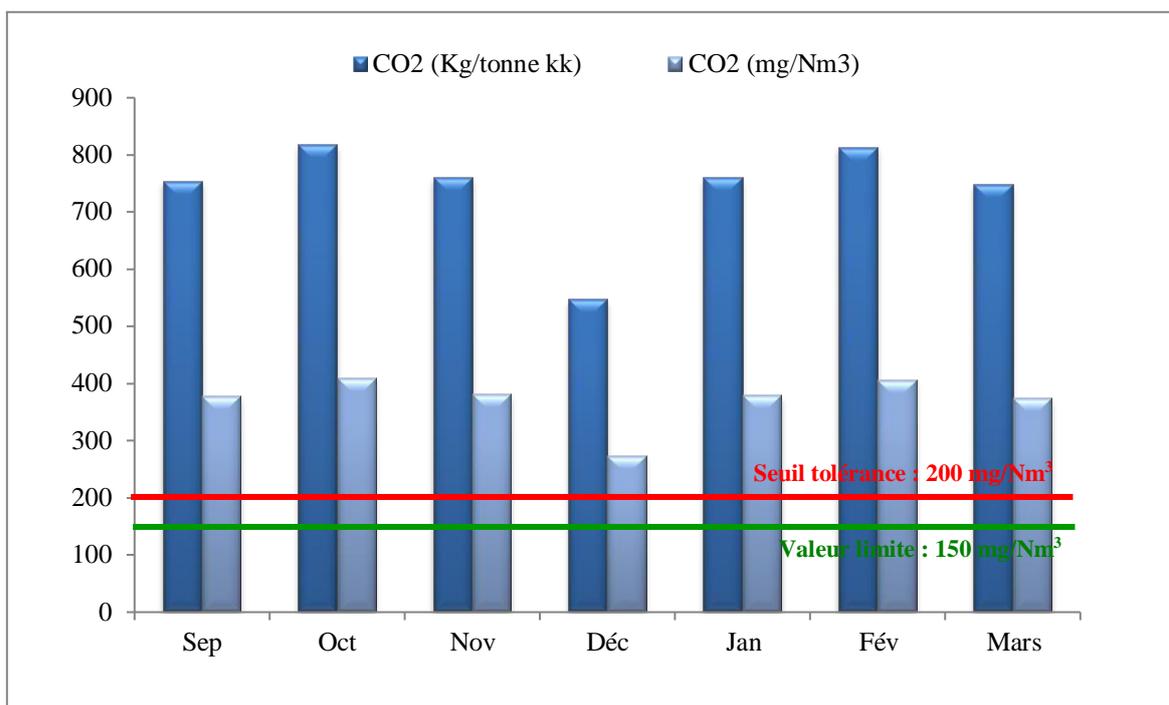


Figure 18 : Variations temporelles des émissions moyennes en CO₂ (Sept 2018-Mars 2019)

En matière de réglementation, le décret exécutif n°06-138 (JORA, 2006) préconise une valeur limite de l'ordre de 150 mg/Nm³ et une tolérance des valeurs limites pour les installations anciennes de l'ordre de 200 mg/Nm³. La comparaison de nos résultats à ces normes montre que les taux en CO₂ estimés au niveau de la cheminée dépassent aussi bien la valeur limite que le seuil de tolérance et ce durant toute la période de surveillance.

Les émissions du dioxyde de carbone (CO₂) sont rapportées à l'environnement global. Le CO₂ étant un gaz à effet de serre dont les conséquences dépassent le cadre de la cimenterie. Au niveau des cimenteries, les émissions de CO₂ proviennent de la combustion des gaz alimentant les fours et de la décarbonatation du calcaire selon la réaction suivante : $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$. Environ 60 % des émissions de CO₂ sont issus de la décarbonatation

et les 40 % restant issus de la combustion du combustible. Le ciment contient typiquement 63.5 % de CaO. Par conséquent, 1.135 kg de calcaire sont nécessaires pour produire 1 tonne de ciment tandis que la quantité de CO₂ libérée lors de la cuisson s'élève à 500 kg/tonne de ciment produit. Les émissions de CO₂ totales liées à la cuisson s'élèvent à 0.85-1.35 tonnes par tonne de clinker (EHS, 2010).

La seule façon de réduire les émissions de CO₂ est d'utiliser des produits déjà décarbonatés, tels que les laitiers de sidérurgie. Ils sont généralement utilisés en substitut partiel du clinker car ils disposent d'une aptitude au développement des résistances mécaniques similaires au clinker (Namoulniara, 2015).

En France, avec une production hexagonale de 18 millions de tonnes de ciment par an et un chiffre d'affaires de 2 milliards d'euros, l'industrie cimentière représente 2,9 % des émissions de CO₂. Une empreinte carbone importante pour un secteur qui ne compte qu'une quarantaine de sites industriels. Néanmoins, grâce à des efforts pour une gestion plus écologique entrepris depuis 30 ans, le secteur a réduit de 40 % ses rejets de CO₂. Selon Aliye (2018), la filière compte poursuivre sur cette lancée et annonce que le secteur convergera avec la stratégie très bas-carbone nationale pour atteindre une réduction de 80 % des émissions carbonées à l'horizon 2050, par rapport à 2016 (passant ainsi de 656 kg de CO₂/tonne de ciment à 130 kg de CO₂/tonne de ciment entre 2016 et 2050).

5. Les émissions en SO₂ :

Le tableau ci-dessous (tab. 08) représente les résultats des taux en SO₂ émis par la cimenterie Hamma Bouziane durant deux trimestres (Oct-Déc 2018 et Jan-Mars 2019), ainsi que la valeur limite d'émission de SO₂ et le seuil de tolérance pour les installations anciennes fixés par la réglementation algérienne.

Tableau 08 : Variations temporelles des taux en SO₂ émis par la cimenterie Hamma Bouziane

Mois	Oct-Déc 2018	Janv-Mar 2019
SO ₂ (mg/Nm ³)	0	0
Valeurs limites (mg/Nm ³) (JORA, 2006)*		500
Tolérance pour les installations anciennes (JORA, 2006)*		750

Décret exécutif N° 06-138 du Rabie El Aouel 1427 correspondant au 15 avril 2006

Les taux en SO₂ quantifiés à l'émission au niveau des rejets de la cimenterie Hamma sont nuls aussi bien pour le 1^{er} trimestre que pour le second. Ces taux sont par conséquent en

dessous de la valeur limite (500 mg/Nm^3) mais aussi du seuil de tolérance (750 mg/Nm^3) fixés par la réglementation algérienne dans le décret exécutif N°06-138 (2006), mais aussi ceux fixés par la réglementation internationale (tab. 07).

Les émissions en SO_2 des cimenteries dépendent de l'apport total de composés soufrés et du type de procédé utilisé. Elles sont principalement déterminées par la quantité de soufre volatil présent dans les matières premières et éventuellement par les combustibles (Commission européenne, 2010). Une étude de vérification d'absence d'impact des émissions atmosphériques a été réalisée en 2011 sur l'usine d'Airvault en France. Les auteurs ont constaté que l'industrie en question respecte toutes les valeurs limites pour l'ensemble des polluants émis à l'exception de celui concernant les émissions de SO_2 . Celui-ci dépasse la valeur limite qui est de l'ordre de 400 mg/Nm^3 . Un tel état des lieux a été attribué directement à un contexte géologique à forte teneur en soufre. En effet, les concentrations élevées en SO_2 proviennent d'un fort taux de sulfures contenus dans les matières premières (Rapport Cimenterie d'Airvault, 2015).

La production et les émissions potentielles de SO_x dépendent également de la circulation du soufre à l'intérieur du four. Dans le four, le soufre provient de différentes sources, comme le SO_2 des gaz résiduels, le CaSO_4 et d'autres composés combinés dans le clinker et les poussières. Cependant, la plus grande partie du soufre est absorbée par le clinker, dans le broyeur, 20 à 70 % du SO_2 seront réabsorbés par les matières premières finement broyées. Il est donc très important d'optimiser cette opération, car le broyeur joue un rôle dans la réduction des émissions de SO_2 . Au niveau de la cimenterie Hamma Bouziane, le combustible utilisé (gaz naturel) est exempt de soufre. La matière première n'en contient que 0,2 %. Ceci pourrait expliquer l'absence du SO_2 dans les gaz émis par la cimenterie Hamma Bouziane. Etant donné la présence insignifiante de soufre dans les matières premières, les SO_x existent a priori sous forme de traces (EHS, 2010).

6. Les émissions de poussière (PM) :

Le tableau ci-dessous (tab. 09) et la figure 19 résume et illustre les résultats des émissions en poussières émises par la cimenterie Hamma Bouziane durant la période allant du mois d'octobre 2018 au mois de décembre 2018, et du mois de janvier 2019 au mois de mars de 2019. Nous tenons à rappeler que la mesure de ce paramètre est effectuée une fois tout les trois mois. Sur ce même tableau figurent la valeur limite et le seuil de tolérance fixés dans l'article 3 du Décret exécutif n°06-138 du 5 avril 2006 réglementant l'émission dans l'atmosphère de poussière.

Tableau 09 : Variations temporelles des taux en poussières émises par la cimenterie
Hamma Bouziane

Points de mesures	PM (mg/Nm ³) Oct-Déc 2018	PM (mg/Nm ³) Janv-Mar 2019
Cheminée filtre BK1	27,25	21,15
Cheminée filtre BK2	20,28	2,45
Cheminée filtre AAF	2,031	3,22
Cheminée filtre REDECAM	18,46	6,22
Valeur limite (JORA, 2006)*		30
Tolérance pour les installations anciennes (JORA, 2006)*		50

Décret exécutif N° 06-138 du Rabie El Aouel 1427 correspondant au 15 avril 2006

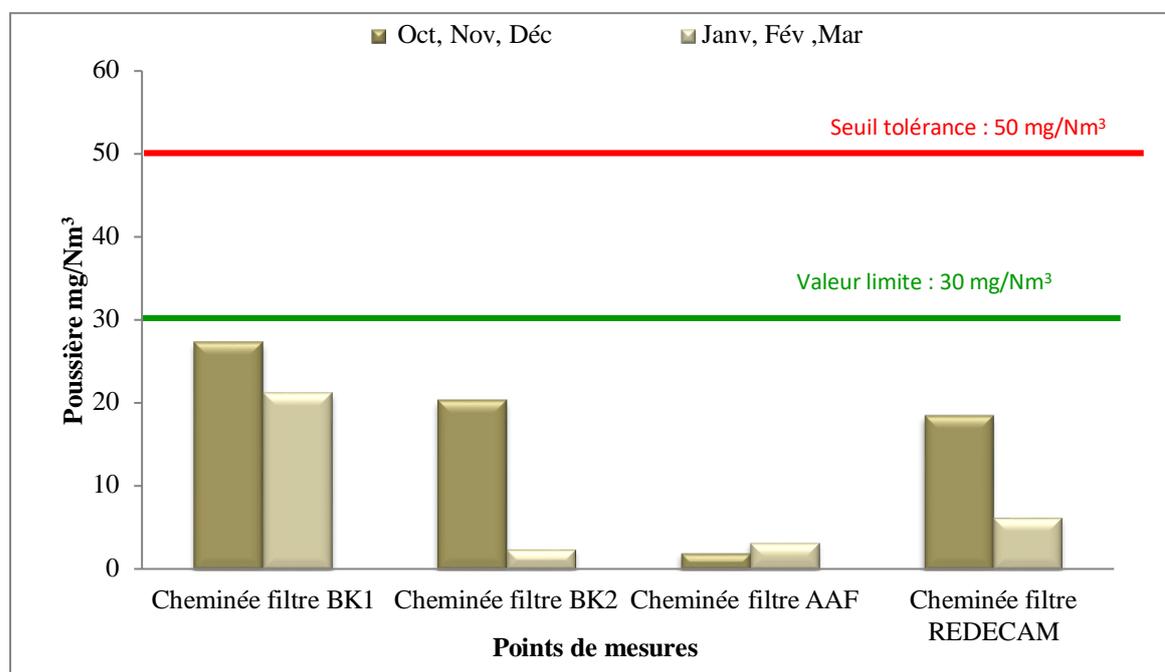


Figure19 : Variations temporelles des émissions de de poussières
(Oct-Déc 2018 et Jan-Mar 2019)

Pour le suivi des émissions de poussières, la cimenterie Hamma Bouziane dispose des appareils de mesure de type DEM100, positionnés au niveau des filtres BK1, BK2, AAF, REDECAM. L'examen de la figure 19 et du tableau 09 montre que les taux en poussières fluctuent d'un emplacement à l'autre. Nous avons enregistré les séquences suivantes pour les périodes 1 (Oct-Déc 2018) et 2 (Janv-Mars 2019) respectivement : BK1 > BK2 > REDECAM > AAF, et BK1 > REDECAM > AAF > BK2.

Le taux le plus faible (2.45 mg/Nm³) a été enregistré durant la période (Janv-Mar 2019) au niveau du filtre BK2, alors que le taux le plus élevé (27.25 mg/Nm³) a été enregistré durant la période (Oct-Déc 2018) au niveau du filtre BK1.

Par ailleurs, il est à noter que les taux de poussières au niveau de la cimenterie Hamma Bouziane varient en fonction des périodes. Cette différence est souvent attribuée à la quantité de clinker produite. Selon les données de l'industrie en question, la quantité de clinker produite durant la première période (245063 tonnes) dépasse largement celle de la deuxième période d'observation (159838 tonnes).

La comparaison de nos résultats aux seuils fixés par la réglementation algérienne, montre que les taux en poussières sont en dessous de ces seuils (30 mg/Nm^3 et 50 mg/Nm^3) et ceci quelque soit l'emplacement du filtre et quelque soit la période d'observation.

Traditionnellement, l'émission de poussières, en particulier les rejets des cheminées des fours, a toujours été la préoccupation principale en matière d'environnement pour la fabrication de ciment. Les principales sources d'émissions de poussières sont les fours, les stations de broyage des matières premières, les refroidisseurs à clinker et les broyeurs à ciment, car ce sont des équipements où circulent des volumes importants de gaz au travers de matériaux poussiéreux. La conception et la fiabilité des filtres électrostatiques et des filtres à manches modernes permettent d'abaisser les émissions de poussières à des niveaux négligeables, inférieurs à 10 mg/m^3 dans certaines installations.

La cimenterie Hamma Bouziane s'est dotée de filtres à manches installés à des emplacements stratégiques par rapport au processus de fabrication du ciment. Ces filtres ont été installés dans la cimenterie pour garantir une exploitation conforme des installations et éviter une augmentation disproportionnée des frais d'usure des machines, une teneur en poussière élevée très gênante à l'emplacement des postes de travail, et des pertes de production. En effet, les filtres installés permettent de réduire d'une façon significative les émissions de poussières. Ils captent des concentrations importantes des particules de poussières à la sortie du four et des broyeurs. Les poussières récupérées par ces filtres peuvent soit être réincorporées comme matériau dans le procédé ou en seront extraites sous forme de matières résiduelles. A la cimenterie Hamma Bouziane, les poussières récupérées par les filtres à manches sont recyclées et réutilisées comme matières premières.

La Figure 20 montre un exemple d'émissions de poussières pour une tonne de clinker produite dans une cimenterie dans la région de wallon en Europe, dont les données comprenant les émissions du four à clinker et des autres installations (broyeurs charbon, sécheur laitier,...etc.).

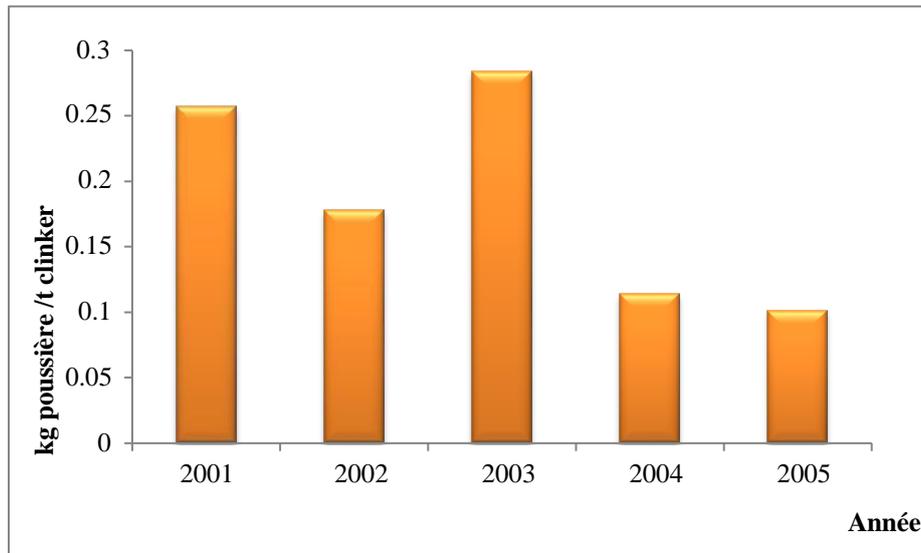


Figure 20 : Émissions de poussières ramenées à la tonne de clinker produite

L'augmentation des émissions de poussières en 2003 s'explique notamment par l'usure d'un électro-filtre dans cette cimenterie. Son remplacement par un filtre à manches à haute performance a permis de réduire de façon très significative les émissions de poussières de four dans cette usine. D'après les statistiques illustrées sur la figure 20, ce remplacement, combiné à d'autres mesures prises sur d'autres fours (placement de nouveaux filtres à manches et rénovation d'anciens électro-filtres), a permis d'atteindre des valeurs particulièrement basses en 2004 et 2005.

La réduction des émissions de poussières aux fours est particulièrement importante. En effet, les poussières ont la propriété de fixer certaines substances polluantes (comme les métaux lourds). En réduisant les émissions de poussières, on limite donc également les émissions de ces polluants. Même si la relation n'est pas linéaire, la réduction des poussières permet de réduire en partie les émissions de microparticules inférieures à dix microns.

Conclusion et perspectives

L'objectif de ce travail était de contribuer à l'évaluation de la qualité des émissions de gaz et de poussières dans l'atmosphère provenant de l'industrie cimentaire ; il s'agit de la cimenterie Hamma Bouziane.

Ainsi des mesures in situ et des mesures 24h/24 ont été effectuées au niveau de la cimenterie pour quantifier l'émission des oxydes d'azote (NO_x), de l'oxygène (O₂), du monoxyde de carbone (CO), des estimations d'émissions mensuelles du dioxyde de carbone (CO₂), des taux de poussières, et du dioxyde de soufre (SO₂).

A l'issue de ce travail, les principales conclusions peuvent être résumées comme suit :

- Les émissions en NO_x sont dans l'ensemble conformes à la réglementation. Ces derniers se forment soit lors de la combustion dans la zone de clinkérisation, soit dans les zones de calcination ou précalcination,

- L'émission du monoxyde de carbone (CO) dépend de la teneur en matières organiques des matières premières mais elle peut aussi être due à la mauvaise qualité de la combustion provoquée par une mauvaise régulation de l'alimentation en combustible solide. Les taux en CO émis par la cimenterie Hamma Bouziane dépassent aussi bien la valeur limite (150 mg/Nm³), que le seuil de tolérance admis pour les installations anciennes (200 mg/Nm³).

- De même, les taux en CO₂ sont considérablement élevés. Ce gaz provient de la combustion des gaz alimentant les fours et de la décarbonatation du calcaire. Ainsi, d'un point de vue fondamental, il serait intéressant de développer des procédés permettent de réduire leurs émissions comme la réduction de l'énergie nécessaire à la fabrication d'une tonne de ciment. L'oxy-combustion qui consiste à ajouter l'oxygène dur pour réduire la consommation de carburant, c'est-à-dire la réduction des émissions de CO₂ contrôlées en continu, est aussi une des solutions peu coûteuse et peu polluante. Une autre façon de réduire encore les émissions de CO₂ est d'utiliser des produits déjà décarbonatés, tels que les laitiers de sidérurgie. Ils sont généralement utilisés en substitut partiel du clinker car ils disposent d'une aptitude au développement des résistances mécaniques similaires au clinker.

- Contrairement aux gaz précédant, les émissions en oxygène ne sont pas réglementées sur le plan national. Même si l'excès d'oxygène, constituant l'un des gaz résiduaire principaux d'un four à ciment, n'agit pas d'une manière directe sur l'environnement, le contrôle des

émissions en O₂ sont indispensables. En effet, l'excès d'oxygène au niveau des gaz émis par les cimenteries peut contribuer à la formation des NO_x ; un des polluants les plus redoutables dans l'industrie du ciment.

- L'absence ou encore la présence insignifiante sous forme de traces de SO₂ dans les rejets atmosphériques de ladite cimenterie sont directement liées à l'exemption de soufre dans le combustible et à la matière première. En effet, la cimenterie Hamma Bouziane, utilise le gaz naturel comme combustible. Ce dernier étant exempt de soufre ; il ne contient que 0,2 %.

- Pour les poussières, les taux enregistrés sont en dessous des seuils fixés par la réglementation algérienne (30 mg/Nm³ et 50 mg/Nm³) et ceci quelque soit l'emplacement du filtre et quelque soit la période d'observation. En effet, depuis 2010 la cimenterie Hamma Bouziane s'est dotée de filtres à manches installés à des emplacements stratégiques par rapport au processus de fabrication du ciment. Ces filtres ont été installés dans la cimenterie pour garantir une exploitation conforme des installations. Notons par ailleurs, que les poussières récupérées par les filtres sont recyclées et réutilisées comme matières premières.

En perspectives et d'un point de vue fondamental, il serait intéressant de :

- confirmer les résultats obtenus en effectuant une surveillance sur une période beaucoup plus longue,
- de quantifier d'autres polluants posant problèmes au niveau des cimenteries notamment les éléments traces métalliques, les COV, HCl, les dioxines et les furanes,
- de spécifier la quantification des polluants particulaires, en quantifiant chacune des différentes fractions à part : PM_{2.5}, PM₁, PM_{0.1}.
- de caractériser les rejets liquides notamment ceux issus du lavage des engins et des purges des installations et des fuites.

Références bibliographiques

Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie-ADEME. 2003. Guide pratique information des citoyens : qualité de l'air. 2003b. pp.10.
<http://www.ademe.fr/particuliers/Fiches/3688/>

Aliye K. 2018. Emission de CO₂. L'industrie cimentière mobilisée pour une diminution de 80% d'ici 2050. Le magazine d'actualité, Environnement.
<https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/emission-de-co2-lindustrie-cimentiere-mobilisee-pour-une-diminution-de-80-dici-2050-61299/>

Allemand N. 2003. Estimation des émissions de polluants liées à la combustion du bois en France. Rapport Final. Etude réalisée pour le Centre Technique du Bois et de l'Ameublement dans le cadre du programme : Recherche des conditions optimales de cadrage réglementaire de la valorisation énergétique des bois faiblement adjuvantés. 105p

Aoudia A. 2010. Cartographie de la distribution de la pollution atmosphérique d'origine automobile au niveau de la région d'El Kala en utilisant Pistacia lentiscus. Mémoire de master, Université Badji Mokhtar-Annaba, 11-12p.

Baer N. S. & Banks P.N. 1985. Indoor air pollution-effects on cultural and historic materials. Int.J.Museum Management & Curatorship, 1985. n°4, pp.9-20

Bahamid F. 2017. Industrie du ciment, de belles performances et des perspectives prometteuses. Revue du ministère de l'industrie et des mines. N°00 Novembre-Décembre 2017. 41p.

Belboum S. 2008. Influence de l'utilisation des combustibles de substitution sur le cycle de vie du ciment. Mémoire d'ingénieur. Université de Liège. 115p.

Cassadou S., Nicoulet I., Noppe J., Chiron M., Rouhan A.B., BASSI C. Vinot J. P., Desqueyroux H. & Nedellec V. 2004. Sélection des agents dangereux à prendre en compte dans l'évaluation des risques liés aux infrastructures routières. Ministère de la santé et des solidarités. 78 p.

Cembureau-European Cement Association. 1999. Best available techniques for the cement industry. A contribution from the European Cement Industry to the exchange of information and preparation of the IPPC BAT REFERENCE Document for the cement industry. 237p.

Centre d'activités régionales pour la production propre-CAR/PP. 2008. Manuel de prévention de la pollution dans le secteur du ciment. 271p.

Centre d'Etudes et de services Technologiques de l'Industrie des Matériaux de Construction-CETIM. 2016. Étude de danger de la cimenterie de Hamma Bouziane Constantine SCHB, Groupe Industriel des Ciments d'Algérie(GICA), 10p.

Centre Interprofessionnel d'Etudes de la Pollution Atmosphérique-CITEPA. 2004.

Calcul des émissions dans l'air, principes et méthodologies généraux,16-17p.

Chambrion P., Kyotani T., Tomita A. 1998. C-NO reaction in the presence of O₂, 27th International Symposium on Combustion, The Combustion Institute, Boulder, Colorado USA, 3053-3059p.

Chan L.K., Sarofim A.F., Beer J.M. 1983. Kinetics of the NO-Carbon reaction at fluidized bed combustor conditions, Combustion and Flame, Vol 52, 37-45p.

Chiron M. 2004. La pollution de l'air par les transports : Effets sur la santé. Communication orale à visée didactique. : 2004a.

Chovin L. et Roussel A. 1999. Physicochimie et pathologie des polluants atmosphériques, 7-8p.

Commandre J.M. 2002. Formation des oxydes d'azote lors de la combustion de coques de pétrole dans des conditions de précalcinateur de cimenterie. Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse. 257p.

Commission européenne, 2000. Directive 2000/76/EC of the European Parliament and of the Council of 4 December 2000 on the incineration of waste, Bruxelles.

Commission européenne, 2010. Industries du ciment, de la chaux et de la magnésie, Document de référence sur les meilleures techniques disponibles, 38-75-106-107p.

Diaf N., Bouchaour M., Merad L. et Benyoucef B. 2003. Paramètres Influençant la dispersion des polluants gazeux. Laboratoire des Matériaux & Energies Renouvelables, Facultés des Sciences, Université de Tlemcen. Rev. Energ. Ren. ICPWE, p. 139-142.

El Fuladi A.E. 2002. Macro pollution : les pluies acides. Causes, Impacts, Mécanisme de contrôle, Stratégie canadienne. Montréal (Québec) Université de Montréal, 2002. 45 p.
www.lemig.umontreal.ca/cours/geo1312/.

Elichegaray Ch. 2008. La pollution de l'air : sources, effets et prévention. Edition Paris : DUNOD, 48p.

Environnement Hygiène Santé-EHS. 2010. Audit relative au suivi environnemental de la cimenterie Hamma Bouziane. Constantine SCHB, Groupe Industriel des Ciments d'Algérie (GICA), 9-56-52 -57p.

Giec. 2001. Bilan 2001 des changements climatiques : Les éléments scientifiques. 90 p.

Hadjoudj M. et Khalfallah A. 2016. L'impact des CKD sur l'environnement (cimenterie de Lafarje a M'sila). Mémoire de master en Valorisation des Ressources Minérales. Université Abderrahmane Mira de Bejaia. 66p.

Hernandez Z. 2003. Guide de l'air. Edition Seuil, 26p.

Huber L. 2007. Bioclimatologie concepts et application. Edition sané de percevaux, 69-70 - 71 p.

Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques-ENERIS. 2010. Possibilités techniques et économiques de réduction des émissions de NOx dans le secteur des cimenteries françaises. Rapport d'étude N°DRC-10-103689-01371A. 73p

Jahnich M. 2003. Le traitement multimédiatique d'un risque pour la santé, étude d'un cas: le problème des gaz d'échappement. Thèse de Doctorat. École Normale Supérieure de Cachan, p 169.

Jasienski A. 2014. Le béton de demain perspectives urbanistiques et architecturales. Rapport annuel de l'industrie cimentière belge. 43p.

Jean-Michel C. 2002. Formation des oxydes d'azote lors de la combustion de cokes de pétrole dans des conditions de précalcinateur de cimenterie. Thèse de doctorat, Sciences de l'ingénieur physics, Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT, 264p.

Journal Officiel de la République Algérienne-JORA. 2006. décret exécutif N°06-138 du Rabie El Aouel 147 correspondant au 15 Avril 2006 règlement l'émission dans l'atmosphère de gaz, fumés, particules liquides ou solides, ainsi que les conditions dans lesquelles s'exerce leur contrôle.

Journal Officiel de la République Algérienne-JORA. 1983. La loi n°83-03 du 5 février relative à la protection de l'environnement.

Journal Officiel de la République Tunisienne-JORT. 2010. Décret n° 2010-2516 du 28 septembre 2010, portant ratification d'un programme exécutif de coopération entre le

gouvernement de la République Tunisienne et l'organisation mondiale de la propriété intellectuelle pour la période 2010-2011.

Lambert S. 1995. Manuel de l'environnement à l'usage des industriels. Edition AFNOR, 10p.

Legras B. 2002. Le trou d'ozone. <http://gershwin.ens.fr/legras/Cours/meteo/ozone.sxi.pdf>

Lovett GM., Tear TH., Evers DC., Findlay SEG., Cosby BJ., Dunscomb JK., Driscoll CT., Weathers KC. 2009. Effects of air pollution on ecosystems and biological diversity in the Eastern United States. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 1162:99-135.

Louadah H. 2016. Mesure et estimation de la pollution d'origine automobile dans la ville de Bejaia. Mémoire de Master. Université Abderahmane Mira-Bejaia. 41p.

Luiset N. 2000. Les pluies acides. Université de Haute-Savoie. <http://www.univ-savoie.fr/mse/ressources/rapports/rapports00/Luiset/>.

Masclet P. 2005. Pollution atmosphérique, causes, conséquences, solutions et perspectives Edition Ellipses, Paris, p18-19-54p.

Melieres M.A. 2002. Effet de serre.

<http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosclim/sysfacte/effetserre>

Michelot N. 2014. L'influence des topoclimats sur la pollution de l'air aux particules dans le sud-ouest des Alpes-Maritimes. Thèse de doctorat. Université de Nice Sophia-Antipolis. 416p.

Namoulniara K.D. 2015. Etude expérimentale de la diffusion du CO₂ et des cinétiques de carbonatation de matériaux cimentaires à faible dosage en clinker. Thèse de doctorat- Université de la Rochelle, France, 184p.

Nguyen T.H.T. 2013. Émissions polluantes des NO_x : Mécanisme de formation et de réduction. Thèse de doctorat. Université du Littoral Côte d'Opale. France. 193p

Popscu M., Blanchar DJ., et Carre M. 1998. Analyses et traitement physicochimique des rejets atmosphérique industriels, émission, fumées, odeurs et poussières. Edition Masson. 12-20p.

Pillet G et Zein K. 2002. Tableau de bord méso-économique des couts et bénéfices environnementaux de l'industrie du ciment en Algérie Résultats et guide méthodologique 6p.

Ramade F. 2011. Introduction à l'écochimie : les substances chimiques de l'écosphère à l'homme. Edition TCE et DOC, 122-12p.

Rapport cimenterie d’Airvault. 2015. Dossier de demande dérogation concernant les niveaux limites d’émission du dioxyde de soufre (SO₂). Résumé non technique, p2.

Siemens 2000. Oxymat 61 analyseur d’oxygène pour application standard 7MB2001, siemens, 3-5p.

Siemens, 2005. Ultramat 23 analyse de gaz, instruction de service édition manuel, siemens, 3 - 2p.

Smith A.R. 1872. Air et pluies : les débuts de la climatologie chimique.

Thomson G. 1986. The museum environment. Butter Worth & Co, 2^{ème} Edition.

Tullin C.J., Sarofim A.F., Beer J.M. 1993. Formation of NO and N₂O coal combustion : the relative importance of volatile and char nitrogen, 12th International Conference on Fluidized Bed Combustion, 599_609p.

Viala E. 1998. Eléments de toxicologie. Edition: Lavoisier, Paris, 328p.

Wagner & Partner. 2000. The european cement industry. Background Assessment For the IPTS BAT-Competitiveness Project. 73p

Sites internet :

<https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/emission-de-co2-lindustrie-cimentiere-mobilisee-pour-une-diminution-de-80-dici-2050-61299/>

<http://www.schb.dz/processus-de-fabrication-du-ciment/>

<http://www.environnement-sa.fr/produits/mesure-des-gaz-moteur/>

<http://delta-neu.fr>

<https://www.usinenouvelle.com/expo/appareil-de-contrôle-des-rejets-de-pous-p191811595.html>

https://aida.ineris.fr/sites/default/files/directive_ied/BATCONC_Ciment260313.pdf

https://www.febelcem.be/fileadmin/user_upload/rapport-environnemental/fr/rapport-environnemental-ciment-2006-fr.pdf.

<http://environnement.wallonie.be/enviroentreprises/input/acrobat/Rapport%20Ciment%2007.pdf>

Annexes

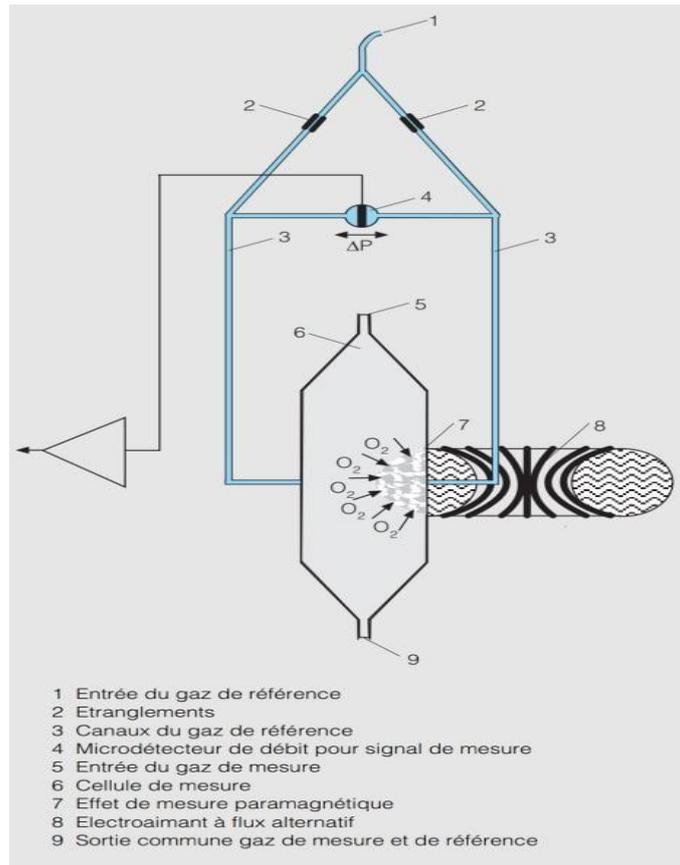
Annexe 01

Principe de fonctionnement de l'OXYMAT 61 :

Contrairement à presque tous les autres gaz, l'oxygène est paramagnétique. Cette propriété est utilisée dans les analyseurs de gaz OXYMAT 61 comme principe de mesure.

Dans un champ magnétique inhomogène, les molécules d'oxygène sont attirées, du fait de leur paramagnétisme, vers la zone de champ la plus élevée. Si deux gaz de concentrations différentes en oxygène se rencontrent dans un champ magnétique, il se produit entre eux une différence de pression. Pour l'OXYMAT 61 (Fig.), l'un des gaz (1) est un gaz de référence (N_2 , O_2 ou air), l'autre le gaz de mesure (5). Le gaz de référence est amené à la cellule de mesure (6) par deux canaux (3). L'un des deux flux de gaz de référence rencontre le gaz de mesure dans le champ magnétique (7). La pression, proportionnelle à la teneur en oxygène du gaz de mesure, provoque un écoulement forcé du gaz de référence par le canal de jonction, à travers un microdécteur de débit (4), qui convertit ce débit en un signal électrique. Le microdécteur de débit se compose de deux grilles de nickel chauffées à environ $120^\circ C$ qui forment, avec deux résistances complémentaires, un pont de Wheatstone. Le débit pulsé fait varier les résistances des grilles de nickel, d'où un déséquilibre du pont en fonction de la concentration d'oxygène contenue dans le gaz de mesure. Comme le microdécteur de débit est placé dans le flux du gaz de référence, la mesure n'est pas influencée par la conductibilité thermique, la chaleur spécifique et le frottement interne du gaz de mesure. Indépendamment de cela, le détecteur est protégé contre la corrosion puisqu'il n'est jamais en contact avec le gaz de mesure.

Grâce à l'utilisation d'un champ magnétique alternatif (8), l'écoulement initial du gaz de référence n'est pas pris en compte par le détecteur, de sorte que la mesure est indépendante de la position de la cellule et de ce fait de l'inclinaison de l'analyseur lui même. Le volume de la cellule de mesure traversée directement par le gaz de mesure est faible ; le microdécteur de débit comporte un temps de réaction presque instantané. Ceci confère à l'analyseur de gaz OXYMAT 61 un temps de réponse très court.



Principe de fonctionnement de l'Oxymat 61

(Oxymat 61 analyseur d'oxygène pour application standard 7MB2001 siemens p3-5)

Annexe 02

Principe de fonctionnement de l'ULTRAMAT 23 :

Dispose de deux principes de mesures sélectifs totalement indépendants.

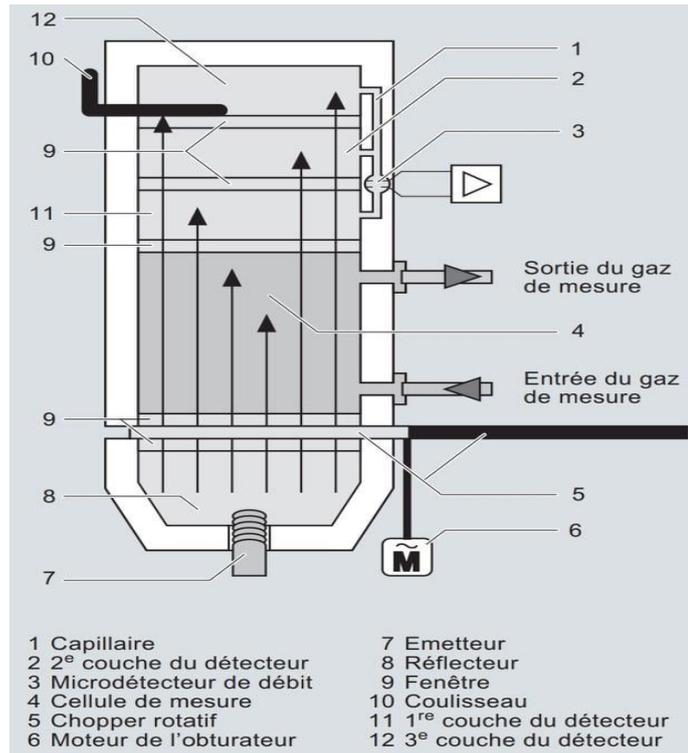
1. Mesure infrarouge

Le principe de mesure de l'ULTRAMAT 23 repose sur l'absorption spécifique des molécules de bandes du rayonnement infrarouge sur la base du procédé monofaisceau. Un émetteur (7) à 600°C émet une radiation infrarouge modulée par un chopper (5) à 8/3 Hz. Après passage de la radiation par la chambre de mesure (4) balayée par le gaz à analyser, celle-ci est atténuée en fonction de la concentration du composant à mesurer. La chambre de réception est remplie par le composant à mesurer et est conçue comme détecteur à deux ou à trois couches.

La première couche du détecteur (11) absorbe essentiellement l'énergie des centres des bandes infrarouges du gaz à mesurer. La deuxième (2) et la troisième (12) couche absorbent l'énergie des flancs.

La couche supérieure et les couches inférieures sont reliées pneumatiquement par un microdétecteur de débit. Un couplage en opposition de la couche supérieure et des couches inférieures rend plus étroite la bande de sensibilité spectrale totale. Un coulisseau (10) permet de modifier également le volume de la troisième couche et donc l'absorption des bandes, et par conséquent d'augmenter individuellement la sélectivité de la mesure.

Le chopper rotatif (5) génère un flux pulsé dans la chambre de réception, flux converti en signal électrique par le microdétecteur de débit (3). Le microdétecteur de débit se compose de deux grilles de nickel chauffées à env. 120 °C qui forment, avec deux résistances complémentaires, un pont de Wheatstone. Du fait du montage très rapproché des grilles de nickel, le débit pulsé fait varier les résistances, d'où un déséquilibre du pont dépendant de la concentration du gaz de mesure.



Principe de fonctionnement infrarouge de l'ULTRAMAT 23

INTITULÉ : Contribution à l'évaluation quantitative et qualitative des émissions dans l'industrie cimentaire : cas de l'unité Djouad Tahar (Hamma Bouziane)

Mémoire de fin de cycle pour l'obtention du diplôme de Master en écologie fondamentale et appliquée

Résumé :

La pollution de l'air résulte de multiples facteurs anthropiques et surtout ceux industriels. La pollution atmosphérique et spécialement celle résultante des émissions des cimenteries est un phénomène très complexe compte tenu de la diversité des polluants. Les niveaux de cette pollution dépendent de la nature et des conditions de rejets ainsi que des conditions atmosphériques qui déterminent le transport, la diffusion et le dépôt de ces polluants.

L'industrie cimentière, utilisant un processus basé sur une combinaison physico-chimique à très haute température, se caractérise par sa consommation intensive en énergie et des émissions atmosphériques importantes de poussière, NO_x, SO₂, CO et CO₂ ayant un impact environnemental conséquent sur l'environnement et la santé.

A cet effet notre stage de fin d'étude effectué au niveau de la cimenterie "TAHAR DJOUAD" de Hamma Bouziane nous a permis d'effectuer une évaluation qualitative et quantitative des émissions de ladite cimenterie durant la période allant du mois de sept 2018 au mois de mars 2019. Des suivis horaires, journaliers, mensuels voir trimestriels ont été effectués pour les émissions des polluants suivants : NO_x, CO, CO₂, SO₂ et taux de poussières.

Les résultats obtenus montrent que les concentrations des gaz (NO_x, SO₂) et de poussières sont dans l'ensemble respectées. Contrairement à ces derniers les taux en CO et CO₂ posent problèmes. Ces derniers étant 4 à 6 fois supérieurs aux normes fixées par la réglementation algérienne.

Mots clés : Cimenterie Hamma Bouziane, NO_x, CO, CO₂, O₂, SO₂, poussières.

Laboratoire de recherche : Laboratoire de Biologie et Environnement.

Jury d'évaluation :

Président du jury : Bazri Kamel Eddine (MCA - UFM Constantine),

Rapporteur : Sahli Leila (MCA - UFM Constantine),

Examineur : Zaïmeche Saida (MCB - UFM Constantine).

Date de soutenance : 18/07/2019 ;