



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des sciences et de la technologie  
Département de chimie industrielle

# MÉMOIRE DE MASTER

**Domaine : Sciences et Techniques**

**Filière : Génie des procédés**

**Spécialité : Génie chimique**

Réf. : Entrez la référence du document

---

Présenté et soutenu par :

**Hendaoui yahia**

Le : dimanche 26 juin 2022

## *Calcul des émissions de CO<sub>2</sub> du four 2 dans la cimenterie BISKRIA*

---

### Jury :

Dr.	CHERIFI Nedjma	MCA	Université de Biskra	Président
Dr.	SMAIL Dalila	MCA	Université de Biskra	Examineur
Pr.	BENDJAOUHDOU Chawki	Pr	Université de Biskra	Rapporteur

## Remerciements

Je remercie Dieu le Miséricordieux de m'avoir donné la force et le temps de faire cet humble travail.

Je tiens tout d'abord à remercier Professeur BENDJAOUHDOU Chawki d'avoir accepté d'être mon encadrant durant ce travail, pour la confiance qu'il m'a accordée et pour ses précieux conseils.

Je remercie également les membres du jury Dr CHERIFI Nedjma et Dr SMAIL Dalida d'avoir accepté le jugement sur mon travail, et je remercie chaleureusement les ouvriers de la Cimenterie de Biskra qui m'ont ouvert leurs portes et m'ont donné l'opportunité de mettre en œuvre ce projet, Et toute l'équipe de performance et tous ceux qui m'ont aidé pendant ma formation en cours d'emploi.

Je terminerai en remerciant avec ardeur et sympathie tous les membres de ma famille qui m'ont toujours soutenu moralement et financièrement tout au long de mes nombreuses années d'études.

# DÉDICACE

A ma Chère Mère Fatima

A mon Père Makhlouf

Dont le mérite, les sacrifices et les qualités  
humaines

m'ont permis de vivre ce jour.

A mon Frères et mes sœurs

Fatima, Amel, Mohamed Khaled, Abdel  
karim, Rania.

## SOMMAIRE

---

### SOMMAIRE

REMERCIEMENT	I
DEDICACE	II
SOMMAIRE	
LISTE DES TABLEAUX	III
LISTE DES FIGURES	IV
INTRODUCTION GENERALE.....	1

### PARTIE THEORIQUE

#### CHAPITRE I : Généralités sur l'industrie du ciment.

INTRODUCTION.....	3
I.1. Définition de ciment .....	4
I.2. Les différents types de ciments .....	4
I.2.1. Le ciment Portland .....	4
I.2.2. Le ciment Portland composé.....	5
I.2.3. Le ciment métallurgique.....	5
I.2.4. Les ciments spéciaux.....	5
I.3 Présentation de SPA Biskria Ciment.....	6
I.3.1 La définition du Biskria Ciment .....	6
I.3.2 Siège social.....	7
I.3.3 Cadre juridique.....	7
I.3.4 Les services .....	7
I.3.5 Les produits.....	7
I.3.6 Principaux constituants de ciment.....	8
I.3.6.1 Matières premières et ajouts correctifs .....	8
I.3.6.1.1 Le calcaire.....	9
I.3.6.1.2 L'argile .....	9
I.3.6.2 Matériaux de correction.....	9
I.3.6.2.1 Minerai de fer ( $Fe_2O_3$ ).....	9
I.3.6.2.2 Le sable.....	10
I.3.6.3 Matières Secondaires.....	10
I.3.6.3.1 Gypse .....	10
I.3.6.3.3 Principaux Constituants du Clinker.....	10

## SOMMAIRE

---

I.3.7 La fabrication de ciment.....	11
I.3.7.1 Extraction des matières premières.....	11
I.3.7.2 Concassage.....	12
I.3.7.3 Stockage de matière première.....	12
I.3.7.4 Pré-homogénéisation.....	13
I.3.7.5 Doseur.....	13
I.3.7.6 Broyage du cru.....	13
I.3.7.7. Homogénéisation.....	14
I.3.7.8 Atelier de Cuisson .....	14
I.3.7.8.1 Préchauffeur ou cyclones .....	14
I.3.7.8.2 Four rotatif.....	15
I.3.7.8.3 Refroidisseur.....	16
I.3.7.9 Stockage du clinker.....	17
I.3.7.10 Broyage du clinker.....	17
I.4 Aperçu sur les analyses du laboratoire contrôle qualité.....	17
I.4.1 La perte au feu .....	17
I.4.2 Analyse par fluorescence X.....	17
Conclusion.....	19

## CHAPITRE II : Relation entre CO<sub>2</sub> et l'industrie de ciment et l'environnement

INTRODUCTION.....	20
II.1. La définition de dioxyde de carbone (CO <sub>2</sub> ) .....	21
II.3. Le cycle de CO <sub>2</sub> dans la nature.....	21
II.4. Le cycle lent du carbone.....	22
II.5. Le cycle rapide du carbone.....	23
II.6. Effets du changement du cycle du carbone .....	24
II.6.1 L'atmosphère.....	25
II.6.2 L'océan.....	25
II.6.3 La terre .....	26
II.7. Effet de serre.....	26
II.8. Le CO <sub>2</sub> et l'effet de serre .....	27

## SOMMAIRE

---

II.9. Le ciment et la production de gaz CO <sub>2</sub> .....	28
II.9.1. La première source de carbone dans l'industrie du ciment .....	29
II.9.2. La deuxième source dans l'industrie du ciment.....	29
II.10. La réduction du ciment émission CO <sub>2</sub> .....	30
II.11. Les méthodes de réduction d'émission de CO <sub>2</sub> dans l'industrie du ciment .....	31
II.11.1. Substitution matérielle.....	31
II.11.2. Efficacité énergétique et substitution de carburant.....	32
II.11.3. Carbonatation des matières premières minérales.....	33
II.11.4. Valorisation biologique.....	33
II.11.5. Dérivés chimiques et gaz de synthèse.....	33
Conclusion.....	33

## PARTIE PRATIQUE :

### CHAPITRE III : Calculs et déterminations de la quantité de CO<sub>2</sub> émises

INTRODUCTION.....	35
III.1. La source n°1 d'émission de CO <sub>2</sub> (la décarbonatation) .....	36
III.1.2. Détermination de pourcentage de CaCO <sub>3</sub> et MgCO <sub>3</sub> .....	37
III.1.2.1. Détermination du % de CaCO <sub>3</sub> .....	37
III.1.2.2. Détermination du % de MgCO <sub>3</sub> .....	38
III.1.3. Calculs du débit massique de CaCO <sub>3</sub> et MgCO <sub>3</sub> .....	39
III.1.4. Calcul des émissions totales de la première source de CO.....	39
III.2. La source n°2 d'émission de CO <sub>2</sub> (par combustion du GNL) .....	40
III.2.1. Définition de GNL.....	40
III.2.1.1. Avantages de l'utilisation du GNL dans la cimenterie.....	40
III.2.2. La composition de GNL .....	41
III.2.3. Calcul les émissions totales de la deuxième source de CO <sub>2</sub> (GNL) .....	42
III.3. La masse totale d'émission de CO <sub>2</sub> pour le four n°2.....	44
CONCLUSION GENERALE.....	45
Références bibliographique.....	46

### RÉSUMÉ

**Chapitre I**

<b>Tableau I.1</b>	Les 27 produits de la famille des ciments courants.	<b>6</b>
<b>Tableau I.2</b>	Les différents types de ciments produits par la société SPA Biskria	<b>8</b>

**Chapitre II**

<b>Tableau. II.1</b>	Les facteurs d'émission CO <sub>2</sub> par rapport carburant.	<b>32</b>
----------------------	--	-----------

**Chapitre III**

<b>Tableau III.1</b>	Le procédé de décarbonatation.	<b>39</b>
<b>Tableau III.2</b>	La procédé de la cuisson.	<b>39</b>
<b>Tableau III.3</b>	Les masses de CO <sub>2</sub> (décarbonations)	<b>40</b>
<b>Tableau III.4</b>	Les débit de gaz GNL injecté	<b>42</b>
<b>Tableau III.5</b>	Les nombres de moles du composés de GNL	<b>43</b>
<b>Tableau III.6</b>	Les nombres de moles émit du CO <sub>2</sub> par chaque constituant	<b>43</b>
<b>Tableau III.7</b>	La quantité total de CO <sub>2</sub> émit de la combustion de GNL	<b>44</b>
<b>Tableau III.8</b>	La masse totale de CO <sub>2</sub> de four °02	<b>44</b>

**Chapitre I**

<b>Figure I.1</b>	Logo SPA Biskria Ciment	<b>7</b>
<b>Figure I.2</b>	Photographie de la carrière d'extraction des matières premières	<b>12</b>
<b>Figure I.3</b>	Photographie montrant les polars de stockage	<b>12</b>
<b>Figure I.4</b>	Photographie d'un broyeur vertical	<b>13</b>
<b>Figure I.5</b>	Photographie d'un silo d'homogénéisation	<b>14</b>
<b>Figure I.6</b>	Photographie d'un four rotatif	<b>16</b>
<b>Figure I.7</b>	Photographie d'un Refroidisseur	<b>16</b>
<b>Figure I.8</b>	Spectroscopie à fluorescence X	<b>18</b>

**Chapitre II**

<b>Figure II.1</b>	Cycle du carbone	<b>22</b>
<b>Figure II.2</b>	Effet de serre	<b>27</b>

**Chapitre III**

<b>Figure III.1</b>	Le procédé de décarbonatation.	<b>36</b>
<b>Figure III.2</b>	La procédé de la cuisson.	<b>36</b>



Le ciment est l'un des matériaux de construction les plus utilisés dans le monde et la production de clinker est énergivore car les unités fonctionnent à des températures élevées. L'énergie utilisée dans l'industrie cimentière représente 2 % de la consommation mondiale d'énergie et plus de 5 % de la consommation mondiale d'énergie liée aux activités industrielles. De plus, suite à l'utilisation généralisée et répandue des combustibles fossiles, tels que le charbon et le gaz naturel, dans le procédé du clinker (une étape majeure dans la fabrication du ciment), l'industrie du ciment est un contributeur majeur aux émissions. En plus du dioxyde de carbone émis lors de la combustion du combustible, le processus de fabrication du clinker libère également du dioxyde de carbone lors du comptage des matières premières (première étape de la conversion des matériaux immatures). L'industrie du ciment contribue à 7 % des émissions mondiales de carbone et émet de 0,65 kg à 0,92 kg de dioxyde de carbone par kg de ciment produit. Cependant, le dioxyde de carbone est un gaz à effet de serre qui contribue de manière significative au réchauffement climatique. Ainsi, dans le contexte de la demande mondiale croissante en énergie et en matériaux manufacturés comme le ciment, il est nécessaire d'effectuer plusieurs mesures pour confirmer le volume d'émissions de gaz généré par cette industrie, ce qui est la première étape pour trouver les solutions nécessaires aux problèmes résultant de ces émissions. [1]

Notre travail vise à évaluer le volume des émissions résultant de l'activité du four 2 de l'unité (BISKRIA CIMENT), Avec en donnant un aperçu du domaine de l'industrie du clinker, et une explication de l'impact du gaz sur l'environnement et sa relation avec cette industrie.

Pour accomplir le travail qui contient tous les résultats et pour interpréter ces résultats, Nous avons conçu notre mémoire en 3 chapitres :

- **Introduction générale :**
- **Chapitre I : Généralités sur l'industrie du ciment**

Le premier chapitre est consacré à la recherche bibliographique, basée sur les notions générales de ciment Portland, sa fabrication et sa caractéristique.

- **Chapitre II : La relation entre CO2 et l'industrie de ciment et environnement**

Le deuxième chapitre est une réalisation de la relation entre les émissions de carbone et l'industrie du ciment, tout en montrant l'impact de ces émissions sur l'environnement.

- **Chapitre III : Calculs et déterminations**

Le troisième chapitre présente les résultats de la recherche et les idées pertinentes pour cette étude.

- **La conclusion générale.**

# CHAPITRE I :

## Généralités sur l'industrie du ciment

**INTRODUCTION**

Le ciment est un secteur capitalistique, vital et énergivore pour la construction d'infrastructures à l'échelle nationale. Bien que l'industrie cimentière algérienne représente une part limitée de la production mondiale, elle a connu une croissance à un rythme croissant par rapport à la demande intérieure ces dernières années. Les tentatives de protection de l'environnement dans les pays en développement, en particulier en Europe, ont contraint les cimenteries à migrer vers des pays aux réglementations environnementales moins strictes. Combiné à une hausse constante des prix réels, cela a donné lieu à une tendance à la performance économique et à l'applicabilité environnementale.

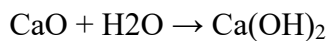
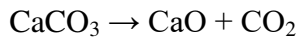
La consommation et la production de ciment sont directement liées au secteur de la construction et donc à l'activité économique générale. Le ciment est l'un des produits de base les plus développés au monde, car il convient de noter que le ciment est connu pour être l'un des matériaux de construction les plus importants au monde. Il est principalement utilisé dans l'industrie du béton en raison de son importance en tant que matériau de construction et de la disponibilité géographique des principales matières premières telles que le calcaire, et le ciment est fabriqué dans presque tous les pays. Le développement à grande échelle est également dû au prix relativement bas et à la densité élevée du ciment, ce qui réduit le transport routier en raison du coût relativement élevé. Le commerce d'exportation (hors commerce frontalier) est généralement limité par rapport à la production mondiale. [1]

Le ciment joue un rôle très important car il est essentiel pour le développement et l'amélioration des infrastructures. Les matériaux cimentaires, comme le béton et le mortier, sont utilisés en très grande quantité dans ce secteur, d'autre part, c'est aussi un polluant majeur. La transformation du ciment génère 5 à 6 % du dioxyde de carbone émis par l'activité humaine, ce qui représente environ 4 % du réchauffement climatique. Il peut émettre de grandes quantités de polluants chimiques chroniques, tels que les dioxines, les métaux lourds et les particules. La consommation d'énergie est également importante. D'autre part, la chimie derrière la fabrication du ciment et ses applications peuvent être très utiles pour résoudre ces problèmes environnementaux. [1]

La fabrication du ciment est une méthode de traitement très énergivore. La consommation d'énergie est mesurée comme environ 2 % de la consommation mondiale d'énergie primaire, ou environ 5 % de la consommation totale d'énergie de fabrication.

**I.1. Définition de ciment:**

Le ciment en général est un matériau adhésif utilisé dans la construction et le génie civil, obtenu en cuisant des roches calcaires à une température élevée de 400 degrés à partir du produit extrait (chaux vive), avec de l'eau, pour obtenir de l'hydroxyde de chaux. La solidification est réalisée par carbonisation sous air selon les réactions :



Après le ciment de ce type est mélangé avec de l'eau, Il devient alors une masse solide et durcit sous l'effet de l'hydratation qui entre dans sa composition.

L'industrie du ciment est rapidement devenue une énorme industrie traitant d'énormes quantités de matériaux. Aujourd'hui, la production mondiale est de plus d'un milliard de tonnes par an. [1]

**I.2. Les différents types de ciments:**

Les différents types de ciment pour la plupart disponibles en plusieurs classes de résistance correspondent à la multiplicité des contraintes d'utilisation. Le tableau I.1 résume les principaux types de ciments fabriqués à travers le monde. [2]

**I.2.1. Le ciment Portland:**

Le ciment Portland est fabriqué en chauffant des matières premières riches en oxydes de silicium, de calcium, d'aluminium et de fer à des températures d'environ 1200 - 1450 C°. Les réactions chimiques qui se produisent dans la masse partiellement fondue entraînent la formation des quatre principaux matériaux cimentaires Parmi ces composés, C3S et C3A sont principalement responsables de la résistance du ciment Des pourcentages élevés de C3S (faible C2S) entraînent une résistance initiale élevée mais également une forte génération de chaleur lors de la prise du béton. [2]

La combinaison opposée de C3S faible et de C2S élevé développe les résistances plus lentement (sur 52 jours au lieu de 28) et génère moins de chaleur. Le C3A provoque une chaleur indésirable et des propriétés de réaction rapide, qui peuvent être évitées en ajoutant du CaSO4 au produit final. Le C3A peut être converti en C4AF plus souhaitable en ajoutant du Fe2O3 avant le chauffage, mais cela inhibe également la formation de C3S. C4AF rend le ciment plus résistant à l'eau de mer et entraîne une réaction un peu plus lente qui génère moins de chaleur. [1]

**I.2.2. Le ciment Portland composé:**

Le ciment Portland composé est un ciment gris, obtenu par broyage de clinker Portland et de cendres volantes siliceuses et de calcaire ou de laitier. Le choix judicieux des proportions des principaux constituants, associé à une finesse de broyage adaptée, conduit à une gamme de ciments de classe 32.5. Dans cette classe de résistance, ce ciment a un développement de résistance modéré, ce qui permet un long temps de traitement.

Ce ciment peut être utilisé dans tous les bétons et mortiers, qui sont utilisés dans un environnement non agressif, qui ne nécessitent pas une résistance élevée à court terme ou un décoffrage rapide. [2]

**I.2.3. Le ciment métallurgique:**

Le ciment métallurgique est un co-produit de la sidérurgie des hauts fourneaux. Toutes les impuretés contenues dans le minerai de fer et le coke se retrouvent dans le laitier de haut fourneau. Des agents de fusion sont ajoutés à la charge du haut fourneau pour obtenir une composition chimique globale des impuretés qui reste dans une zone particulièrement bien définie du diagramme  $\text{SiO}_2 - \text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ . C'est dans cette zone que la température de fusion de ces trois oxydes est parmi les plus basses. Les laitiers sont des silico aluminates de calcium et de magnésium, ils sont essentiellement constitués (à 90 % et plus) de quatre oxydes ( $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO} - \text{MgO}$ ) et contenant en quantité insignifiante les oxydes :  $\text{TiO}_2 - \text{MnO} - \text{FeO}$  et les sulfures :  $\text{CaS}$ ,  $\text{MnS}$  et  $\text{FeS}$ . La composition chimique du laitier de haut fourneau est très variable selon la nature du minéral, le métal à obtenir, le combustible utilisé et les conditions de refroidissement. Cette composition chimique est susceptible d'évoluer au cours des années en fonction du type de minéral, avec l'épuisement des sources. [3]

**I.2.4. Les ciments spéciaux:**

Plusieurs types de ciments spéciaux à résistance améliorée aux sulfates ou à teneur en alcali limitée sont utilisés dans la fabrication de bétons soumis à des conditions opératoires particulièrement sévères.

Tableau I.1. Les 27 produits de la famille des ciments courants [3]

principaux types	Notation des 27 produits (types de ciments courants)		Composition ( pourcentage en masse a) )												
			Constituants principaux												
			Clinker	Laitier de haut fourneau	Fumée de silice	Pouzzolanes		Cendres volantes		Schiste calciné	Calcaire		Constituants secondaires		
						Naturelle	Naturelle calcinée	Siliceuse	Calcaire		L	LL			
K	S	D b)	P	Q	V	W	T	L	LL						
CEM I	Ciment portland	CEM I	95-100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
CEM II	Ciment portland au laitier	CEM I/A-S	80-94	6-20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	Ciment portland à la fumée de silice	CEM II/A-D	90-94	—	6-10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	Ciment portland à la pouzzolane	CEM II/A-P	80-94	—	—	6-20	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-P	65-79	—	—	21-35	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	—	—	—	6-20	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	—	—	—	21-35	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	Ciment portland aux cendres volantes	CEM II/A-V	80-94	—	—	—	—	6-20	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-V	65-79	—	—	—	—	21-35	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/A-W	80-94	—	—	—	—	—	6-20	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-W	65-79	—	—	—	—	—	21-35	—	—	—	—	—	0-5
	Ciment portland au schiste calciné	CEM II/A-T	80-94	—	—	—	—	—	—	6-20	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-T	65-79	—	—	—	—	—	—	21-35	—	—	—	—	0-5
	Ciment portland au calcaire	CEM II/A-L	80-94	—	—	—	—	—	—	—	—	6-20	—	—	0-5
		CEM II/B-L	65-79	—	—	—	—	—	—	—	—	21-35	—	—	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6-20	—	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	—	—	—	—	—	—	—	—	—	21-35	—	0-5
	Ciment portland composé c)	CEM II/A-M	80-94	← 12-20 →									—	—	—
CEM II/B-M		65-79	← 21-35 →									—	—	—	0-5
CEM III	Ciment de haut fourneau	CEM III/A	35-64	36-65	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
CEM IV	Ciment pouzzolanique <sup>c)</sup>	CEM IV/A	65-89	—	← 11-35 →					—	—	—	0-5		
		CEM IV/B	45-64	—	← 36-55 →					—	—	—	0-5		
CEM V	Ciment composé <sup>c)</sup>	CEM V/A	40-64	18-30	—	← 12-20 →			—	—	—	—	0-5		
		CEM V/B	20-38	31-49	—	← 21-35 →			—	—	—	—	0-5		

### I.3 Présentation de SPA Biskria Ciment:

#### I.3.1 La définition du Biskria Ciment:

La société des ciments "BISKRIA CIMENT" est une Société Par Action (S.P.A), privée de

droit Algérien qui a été créé en Janvier 2009. La vocation principale de la société est la production et la commercialisation des ciments. Elle est composée d'une seule entité située au siège de la société. Ses actionnaires sont tous des opérateurs économiques privés Algériens. [3]

### I.3.2 Siège social:

Adresse : DJAR BELAHRACHE, BRANIS, Wilaya de Biskra 07000, ALGERIE

Tél : +213 (0) 33 62 74 62 Fax : +312 (0) 33 62 73 92

E-mail : biskria.spa@gmail.com Site web : biskriaciment-dz.com

### I.3.3 Cadre juridique:

Raison sociale : BISKRIA CIMENT

Forme juridique : société par actions.

Date de création : Janvier 2009.

Activité : production et commercialisation du ciment.

Capital social : 4284.000.000 DA.



Figure I.1 Logo SPA Biskria Ciment [3]

### I.3.4 Les services:

La S.P.A BISKRIA CIMENT possède trois secteurs :

- Secteur administratif : contient de services administratifs pour gérer la société.
- Secteur industriel : contient les trois lignes de production d'une capacité de 05 million T/an.
- Secteur commerciale : contient le service de vente et d'expédition.

### I.3.5 Les produits:

La S.P.A Biskria Ciment produit des ciments de qualité qui sont systématiquement contrôlés par le laboratoire de la cimenterie et périodiquement par le centre d'études et de services technologiques de l'industrie des matériaux de construction CETIM (selon le référentiel ISO 17025), Ces produits sont résumés dans le tableau I.2 ci-dessous :



Tableau I.2. Les différents types de ciments produits par la société SPA Biskria [3]

	
<p><b>Ciment portland CEM I 42.5 R</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Conforme à la norme Algérienne (NA442-2013).</li> <li>• Composition : 95% à 100% de clinker (KK).</li> <li>• Complément à 100% composé d'un ou plusieurs constituants, tel que pouzzolane (Z), calcaire (L), etc. Sulfate de calcium sous forme de gypse en tant que régulateur de prise.</li> </ul>	<p><b>Ciment résistant aux sulfates (CRS) CEM I 42, 5 N SR3 L-H</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Conforme à la norme Algérienne (NA442-2013).</li> <li>• Composition : Au moins 95 % de clinker (KK).</li> <li>• Ajouts : la proportion de constitutions secondaires est limitée à 05%.</li> </ul>
	
<p><b>Ciment portland compose CEM II/A-L 42, 5 R</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Conforme à la norme Algérienne (NA442-2013).</li> <li>• Composition 80% à 94% de clinker (KK).</li> <li>• Complément à 100% composé d'un ou plusieurs constituants, tel que pouzzolane (Z), calcaire (L), etc.</li> </ul>	<p><b>Ciment portland compose CEM II/B-L 32, 5 R</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Conforme à la norme Algérienne (NA442-2013).</li> <li>• Composition 65% à 79% de clinker (KK).</li> <li>• Complément à 100% composé d'un ou plusieurs constituants, tel que pouzzolane (Z), calcaire (L), etc</li> </ul>

### I.3.6 Principaux constituants de ciment:

#### I.3.6.1 Matières premières et ajouts correctifs:

Les matières premières nécessaires à la fabrication du ciment sont le calcaire et l'argile à des proportions variées. Les matières premières sont extraites des parois rocheuses d'une carrière à ciel ouvert par abattage à l'explosif ou par ripage au bulldozer.

**I.3.6.1.1 Le calcaire:**

Le calcaire est une matière minérale d'origine organique et chimique, caractérisée par une composition chimique riche en carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ). Les roches calcaires sont de résistance variable, ont une perméabilité moyenne et se dissolvent rapidement si l'eau qu'elles submergent est riche en dioxyde de carbone.

Les calcaires peuvent être de pureté et de duretés variables, ils proviennent du dépôt de  $\text{CaCO}_3$  contenu dans les eaux de mer ou des lacs, dépôts provoqués par précipitation chimique ou réalisés par l'intermédiaire d'organismes vivants (mollusques, algues), il est aussi utilisé comme matière d'ajout. [3]

**I.3.6.1.2 L'argile:**

L'argile est une roche sédimentaire, composée pour une large part de minéraux spécifiques, silicates en général d'aluminium plus ou moins hydratés, qui présentent une structure feuilletée (phyllosilicates) qui explique leur plasticité, ou bien une structure fibreuse (sépiolite et palygorskite) qui explique leurs qualités d'absorption.

On les classe en trois grandes familles selon l'épaisseur des feuillets (0,7 ou 1 ou 1,4  $\mu\text{m}$ ), qui correspondent à un nombre de couches d'oxydes tétraédriques (Si) et octaédriques (Al, Ni, Mg,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ , Mn, Na, K, ...).

L'interstice entre feuillets peut contenir de l'eau ainsi que des ions. Il en résulte des variations de la distance entre feuillets, et donc des variations dimensionnelles macroscopiques de l'argile quand elle s'hydrate (dilatation) ou s'assèche (contraction pouvant provoquer des fissures). Elles peuvent être classées de plusieurs manières :

- Les argiles résiduelles provenant de la décomposition sur place de roches existantes, du fait d'agents physico-chimiques.
- Les argiles transportées et déposées sous l'effet des mers, des cours d'eau, des glaciers, du vent. Les argiles utilisées en cimenterie sont des argiles communes qui peuvent être constituées par des mélanges des groupes énumérés. [4]

**I.3.6.2 Matériaux de correction:****I.3.6.2.1 Minerai de fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ):**

Le minerai de fer est une roche qui contient du fer, souvent sous forme d'oxydes, comme la bauxite. Les minerais de fer ont une teneur en fer instable en fonction des métaux ferreux, car la symétrie est presque toujours présente dans la plupart des minéraux naturels, ce qui réduit la teneur théorique. [3]

**I.3.6.2.2 Le sable:**

C'est une substance solide sous forme de granulés constitués de très petites particules résultant de la désintégration de matière organique (coquillages, squelettes coralliens, etc.) ou d'origine minérale (principalement des roches) dont la taille varie entre 0,063 mm (limon) et 2 mm (gravier) selon les références géologiques. Sa composition peut contenir jusqu'à 180 minéraux différents (quartz, mica, feldspath, etc.) ainsi que des restes de calcaire.

Le sable est utilisé dans de nombreux usages comme de nombreux matériaux granulaires dans la fabrication du béton, C'est aussi une ressource non renouvelable. [3]

**I.3.6.3 Matières Secondaires:****I.3.6.3.1 Gypse:**

C'est une Roche monominérale cristallisée d'origine sédimentaire formée de sulfate de calcium hydraté ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) utilisée comme régulateur de prise dans les ciments. Les gisements naturels peuvent contenir d'une proportion non négligeable d'anhydrite (sulfate de calcium anhydre:  $\text{CaSO}_4$ ). Seul le gypse (sulfate de calcium hydraté) est utilisé dans la fabrication du plâtre pour former du semi-hydrate ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ ). Un minéral sulfaté mou composé de sulfate de calcium dihydraté de formule chimique, Il est largement extrait et est utilisé comme engrais et comme constituant principal dans de nombreuses formes. [3]

**I.3.6.3.2 Produit semi-fini:**

Le Clinker est un produit renfermant en majeure partie des calciums obtenus par cuisson jusqu'à fusion partielle, (Clinkerisation) d'un mélange dosé et homogénéisé de matières constituées principalement de chaux ( $\text{CaO}$ ), et de silice ( $\text{SiO}_2$ ) en proportion moindre, d'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) et d'oxyde de fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Il présente des propriétés hydrauliques : la régularisation de la composition du Clinker est obtenue par le contrôle contenu des matières premières (calcaire, argile, bauxite, pyrite) dont on combine les proportions de matière à obtenir un mélange final composition convenable. [3]

**I.3.6.3.3 Principaux Constituants du Clinker:**

❖ Silicate tricalcique : Alite « C3S » : 60 à 65%.

Le « C3S » se trouve en très grande proportion dans le « CPA ». C'est l'élément actif du ciment artificiel. Il confère au ciment les résistances initiales à 28 jours de durcissement. Au microscope, il apparaît dans le clinker sous forme de grains de mêmes dimensions, à couleur bien marquée. [5]

❖ Silicate Bicalcique : Bérite « C2S »

Est responsable des résistances mécaniques à longue échéance. La Bélite dans les Clinkers, correspond en général à C2S-β et plus rarement à C2S-α et C2S-α.

Un refroidissement lent donne des produits de décomposition.

Dans les Clinkers industriels et en raison de trempe qui se produit dans les refroidisseurs, la transformation de C2S-β en C2S-γ a très peu de chance d'avoir lieu. [4]

❖ Aluminate tricalcique : Cérite : « C3A » : 1 à 13% :

Il confère au ciment une très bonne résistance initiale à 1 ou 2 jours de durcissement.

Mais par la suite, il influe très peu sur cette dernière. Il est sensible aux eaux de mer à cause des sulfates qu'il contient. Il forme avec les sulfoaluminates de chaux, les sels de Candlot, souvent très expansifs. La réaction d'hydratation est fortement exothermique. [5,6]

❖ C4AF :

C4AF est une solution solide, dont les éléments extrêmes sont ses combinaisons C2F et C2A. Dans cette même série existe les solutions solides C6AF2, C4AF et C6A2F. On peut considérer que dans la forme C4AF, il y a eu remplacement des ions Fe<sup>3+</sup> par des ions Al<sup>3+</sup>. [5,6]

❖ Chaux Libre :

- Chaux libre, présente dans les Clinkers jusqu'à 1.5%.
- Provient de l'excédent de CaO.
- La De gros cristaux de calcite (100 microns).
- Décomposition de l'alite au cours de refroidissement (si la taille de CaO est 1 à 5μ).

[5,6]

❖ MgO > 5%, apparait le péri classe.

### I.3.7 La fabrication de ciment:

#### I.3.7.1 Extraction des matières premières:

Les matières premières sont extraites au niveau de carrière sous forme des blocs de dimensions très variées. L'extraction consiste à extraire du calcaire à partir de carrière djebel M'hor à ciel ouvert (fig I.1) et de l'argile à partir de djebel Etaref.. Ces matières premières sont extraites des parois rocheuses par abattage à l'explosive ou à la pelle mécanique, ou par ripage au bulldozer. Le calcaire et l'argile sont repris par des dumpers vers un espace de stockage. [5]



**Figure I.2 : Photographie de la carrière d'extraction des matières premières [3]**

### **I.3.7.2 Concassage:**

Le rôle du broyeur est de réduire le matériau non mûr dans des proportions de broyeur acceptables. Les matières premières sont fournies par les carrières en gros morceaux et doivent être concassées à la granulométrie requise (0 - 25 mm).

### **I.3.7.3 Stockage de matière première:**

Après l'opération de concassage de ces constituants de base on obtient une granulométrie de 0 à 25 mm, les constituant sont acheminés vers le stock primaire (hall de stockage) par des tapis roulant couvert, pour le pré-homogénéisation : un hall avec un stockage circulaire pour le calcaire (deux polars blanc et rouge de capacité 40 000t chacun) et l'argile (polar vert de capacité 40 000t) (fig I.2).



**Figure I.3 : Photographie montrant les polars de stockage [3]**

**I.3.7.4 Pré-homogénéisation:**

La matière première est répartie en une série de couches horizontales, qui forment finalement une masse dont la composition est tout ce que vous voulez. Les couches sont alors reprises vers le haut, ce qui permet de prélever en permanence le même matériau.

La matière première est extraite du tas de pré-homogénéisation par des roues pelles.

La pré-homogénéisation des matières premières se fait à l'aide du bras du râteau, faisant le tour de l'axe dans le hall.

**I.3.7.5 Doseur:**

Le dosage des différentes composantes est systématisé de manière automatique à l'entrée du broyeur.

**I.3.7.6 Broyage du cru:**

Les procédés de broyage et de séchage des matières premières à raison de 500 tonnes/heure sont réalisés dans un broyeur vertical à sortie centrale, avec une chambre de séchage et deux chambres de broyage. Le séchage se fait avec des gaz de four à 320 - 330°C à intervalles réguliers pour obtenir 5,5% d'humidité.

Pour favoriser les réactions chimiques ultérieures, les matières premières doivent être séchées et finement broyées (quelques microns) dans un broyeur finement broyé (fig. I.3). Cette dernière, la plus récente, est économe en énergie et permet un séchage efficace.



**Figure I.4. Photographie d'un broyeur vertical [3]**

### I.3.7.7 Homogénéisation:

La poudre qui sort du moulin est appelée farine. Cette farine est envoyée dans deux cellules de stockage appelées silos d'homogénéisation (fig. I.4), qui ont une capacité unitaire de 20 000 T.

Pour augmenter l'efficacité de l'homogénéisation, 2 silos sont alimentés et soutirés simultanément. La méthode la plus couramment utilisée pour l'homogénéisation consiste à envoyer de l'air sous les alvéoles, permettant ainsi de réduire la farine.



Figure I.5. Photographie d'un silo d'homogénéisation [3]

### I.3.7.8 Atelier de Cuisson:

#### I.3.7.8.1 Préchauffeur ou cyclones:

L'atelier comporte, en parallèle, dispose des deux préchauffeurs à 5 étages qui fournissent une hotte rotative.

Durant cette phase, le mélange est introduit dans la partie supérieure de la tour de chauffe/pré-calcul, qui est l'antichambre du four. A l'intérieur de la tour, cinq ouragans, sorte d'entonnoirs empilés les uns sur les autres, trouvent tour à tour des matières vertes qui, tombant dans la rivière, se mélangent aux gaz sortant de la fournaise. La croisière est remontée, elle se met donc à chauffer lentement à l'approche du four, évitant ainsi le choc thermique du passage de 20°C à 1400°C pendant quelques secondes, la croisière entame le processus de libération du carbone. Pour ce faire, un four supplémentaire est ajouté à la chaleur la plus basse, qui maintient les gaz à

des températures élevées, entre 800°C et 1000°C. Ce procédé est appelé "pré-calcination", car la matière arrive au centre du four à une température proche de celle du tir. [3]

### I.3.7.8.2 Four rotatif :

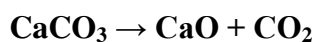
C'est le cœur de la cimenterie. Le four a une enveloppe cylindrique de 74 mètres de long et de 5,2 mètres de large qui est protégée par des briques opposées, inclinées de 3 % par rapport à la surface horizontale. La principale caractéristique du four est la flamme, avec une température d'environ 2000 ° C, qui est produite par la combustion du gaz naturel. [3]

Les matériaux premiers arrivent en haut du four. Cette zone permet aux matériaux d'être chauffés à environ 800-900 ° C, achevant ainsi la décarbonation du calcaire. Les matériaux passent ensuite dans la zone de clinkérisation correspondant à une température d'environ 1450°C à cette température de réaction entre la chaux et les oxydes SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> forment les silicates de calcium, les aluminates et les -lino-ferrites forment le clinker.

La structure principale et la réaction des objets pendant la prise de vue sont exprimées dans les catégories suivantes :

#### Étape 1:

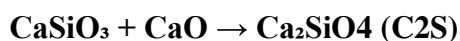
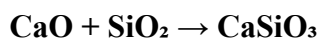
Décarbonation Le calcaire (CaCO<sub>3</sub>) est décomposé en oxyde de calcium (CaO) + gaz carbonique (CO<sub>2</sub>). Ce dernier est évacué par la cheminée.



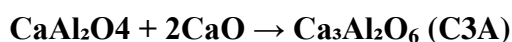
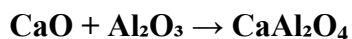
C'est une réaction par force endothermique, à température environ 900 à 1000 °C. Pour 1tonne (1000 kg) de CaCO<sub>3</sub>, on évacue par la cheminée 440 kg de CO<sub>2</sub>. [3]

#### Étape 2 :

Phase de transition II y a la combinaison de CaO avec : Le silicium (Si) pour former du C2S (silicate bi calcique), cette réaction est légèrement exothermique.



L'aluminium (Al) pour former une solution solide d'aluminates de calcium.

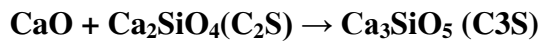


#### Étape 3 :

Phase de prise de vue La température du matériau monte à 1450°C. Pièce Le matériau fond pour élever la phase liquide (qui comprend également la phase aluminat ferrite), cette étape nécessite beaucoup d'énergie. En conséquence, il existe une structure C3S



(Silicate tricalcique) : à partir de 1300°C, le C2S est transformé en C3S par réaction avec partie du CaO non conventionnel. La réaction est exothermique.



La cristallinité et la composition de ces phases influent sur leurs propriétés (couleur par exemple) et leur réactivité en présence d'eau. [3]



**Figure I.6 Photographie d'un four rotatif [3]**

#### **I.3.7.8.3 Refroidisseur:**

L'objectif du refroidisseur ( fig I.6) est de réduire la température du clinker tombant du four à une température d'environ 1135°C à 80-100°C. Il est équipé d'une batterie de ventilateurs qui lui fournissent de l'air de refroidissement pour mener à bien le processus. [6]



**Figure I.7 Photographie d'un Refroidisseur [3]**

**I.3.7.9 Stockage du clinker :**

Après le clinker sort sous forme de granulés de la taille d'une noisette, il est stocké en attendant le broyage pour en faire du ciment après son évacuation par tapis vers le silo à clinker. La capacité de stockage peut atteindre plusieurs dizaines de milliers de tonnes. [5]

**I.3.7.10 Broyage du clinker :**

Le broyage vise à réduire l'agrégat de clinker en poudre, d'autre part, à ajouter plus de gypse (sa fonction de contrôle de la prise), et d'autres possibilités. Composants (pouzzolane, calcaire, sable, etc.), qui permettent d'obtenir différents types de ciment standard. Il est introduit dans les broyeurs à partir de clinker avec divers composants et additifs. Il est produit en continu. Ce type de broyeur qui permet de digérer le clinker en ajoutant des additifs s'appelle :

Broyeur à ciment". En sortie de broyeur, le ciment est acheminé vers les alvéoles plus grandes (de 1 à 6 alvéoles) qui assurent alors l'adéquation avec l'expédition, soit le chargement et le déchargement des matériaux. Ainsi le transport comprend le stockage du ciment et emballage (sacs) en caisse Livrez-le en sacs ou en vrac et chargez-le sur le convoyeur (camion). Il s'agit d'une relation industrielle avec le client. [5]

**I.4. Aperçu sur les analyses du laboratoire contrôle qualité :****I.4.1. La perte au feu :**

La perte au feu est le processus de mesure de la conversion de poids d'un échantillon après qu'il a été exposé à une température élevée qui conduit à chauffer ou à modifier une partie de son contenu. La surveillance nécessaire de l'évolution du poids de l'échantillon pendant le chauffage est effectuée, par exemple, pour déterminer la teneur en matière organique de substances telles que les sédiments, les boues, le sol et les déchets. Les matériaux inorganiques tels que le ciment, la chaux, la bauxite calcinée et les réfractaires peuvent également être testés pour la perte au feu. [3]

**I.4.2 Analyse par fluorescence X :**

La spectroscopie de fluorescence X (XRF) est de plus en plus l'outil analytique de choix pour la mesure directe de la concentration d'éléments atomiques dans une large gamme de matériaux.

En XRF, les rayons X produits par une source irradient l'échantillon. Dans la plupart des cas, la source est un tube à rayons X, mais il peut également s'agir d'un synchrotron ou d'un matériau radioactif. Les éléments présents dans l'échantillon émettront un rayonnement X fluorescent avec des énergies discrètes (équivalentes aux couleurs de la lumière optique) caractéristiques de ces éléments. Une énergie différente équivaut à une couleur différente. En mesurant les énergies (détermination des couleurs) du rayonnement émis par l'échantillon, il est

possible de déterminer quels éléments sont présents. Cette étape est appelée analyse qualitative. En mesurant les intensités des énergies émises (couleurs), il est possible de déterminer la quantité de chaque élément présent dans l'échantillon. Cette étape est appelée analyse quantitative. [7]

La spectrométrie de fluorescence X est une technique d'analyse élémentaire qui permet de :

- ❖ Qualifier les éléments chimiques présents dans un échantillon. Après cette étape nous connaissons les éléments constituant l'échantillon (ex. : Carbone, Fer, Chrome, Nickel...).
- ❖ Quantifier les éléments présents (ex. : Carbone 0.02 %, Fer 72,98 %, Chrome 18 % et Nickel 9 %).

La précision et la reproductibilité de l'analyse XRF sont très élevées. Des résultats très précis sont possibles lorsque de bons échantillons standard sont disponibles, mais également dans des applications où aucun standard spécifique ne peut être trouvé.

Le temps de mesure dépend du nombre d'éléments à déterminer et de la précision requise, et varie entre la seconde et 30 minutes. Le temps d'analyse après la mesure n'est que de quelques secondes. [7]



**Figure I.8 : Spectroscopie à fluorescence X [7]**

**Conclusion :**

L'industrie cimentière et ses partenaires accompagnent cette nécessaire direction de progrès par une démarche volontariste et volontariste, en développant de nombreuses innovations, tant pour la conception, la mise en œuvre ou l'utilisation de leurs matériaux, que sur leurs sites de production.

**CHAPITRE II :**  
**Relation entre CO<sub>2</sub> et**  
**l'industrie de ciment et**  
**l'environnement**

## INTRODUCTION

La menace du changement climatique est considérée comme l'un des principaux problèmes environnementaux. Défis pour notre société. Le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) est l'un des principaux gaz à effet de serre des gaz. Les sources anthropiques de CO<sub>2</sub> sont la combustion de combustibles fossiles, la déforestation, la combustion non durable de la biomasse et l'émission de sources minérales de CO<sub>2</sub>. La production de ciment contribue à l'émission de CO<sub>2</sub> par la combustion d'énergies fossiles, ainsi que par la décarbonations du calcaire. Dans cet examen, nous nous concentrons sur l'industrie du ciment. Les données actuellement disponibles évaluent seulement les émissions provenant de la décarbonations du calcaire, et il n'y a pas d'examen inclusif dès les émissions dues à la consommation d'énergie dans l'industrie du ciment. Ceci est la première critique des émissions totales de CO<sub>2</sub> de l'industrie cimentière mondiale. [8]

Le ciment est l'un des matériaux de construction les plus importants au monde. C'est utilisé principalement pour la production de béton. Le béton est un mélange de minéraux inertes granulats, par exemple, sable, gravier, pierres concassées et ciment. Consommation de ciment et la production est étroitement liée à l'activité de construction et, par conséquent, à l'activité économique générale. En raison de l'importance du ciment en tant que matériau de construction, et en raison de l'abondance géographique des principales matières premières, le ciment est produit dans pratiquement tous les pays. [8]

La production de ciment est un processus de production très énergivore. La consommation de l'industrie cimentière est estimée à environ 2 % de la consommation primaire mondiale.

En raison de l'utilisation dominante de combustibles à forte intensité de carbone, tels que le charbon dans la fabrication de clinker, l'industrie cimentière est une source majeure d'émissions de CO<sub>2</sub>. Outre la consommation d'énergie, le processus de fabrication du clinker émet également du CO<sub>2</sub> provenant du processus de calcination. [8]

**II.1. La définition de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>):**

Le dioxyde de carbone, (CO<sub>2</sub>), un gaz incolore ayant une légère odeur piquante et un goût aigre. C'est l'un des gaz à effet de serre les plus importants liés au réchauffement climatique, mais c'est un composant mineur de l'atmosphère terrestre, formé lors de la combustion de matériaux contenant du carbone, de la fermentation et de la respiration des animaux et employé par les plantes dans la photosynthèse des glucides. La présence du gaz dans l'atmosphère empêche une partie de l'énergie rayonnante reçue par la terre d'être renvoyée dans l'espace, produisant ainsi ce que l'on appelle l'effet de serre. Industriellement, il est récupéré pour de nombreuses applications diverses à partir des gaz de combustion, en tant que sous-produit de la préparation de l'hydrogène pour la synthèse de l'ammoniac, des fours à chaux et d'autres sources. [8]

Le dioxyde de carbone est utilisé dans de nombreux domaines biologiques et industriels. Il est utilisé comme liquide de refroidissement dans les extincteurs, pour gonfler les radeaux de sauvetage et les gilets de sauvetage, pour souffler le charbon, pour vider le caoutchouc et les plastiques, pour favoriser la croissance des plantes dans les serres et dans les boissons. [9]

**II.3. Le cycle de CO<sub>2</sub> dans la nature:**

Le carbone est le quatrième élément le plus abondant dans l'univers. La majeure partie du carbone de la terre - environ 65 500 milliards de tonnes métriques - est stockée dans les roches. Le reste se trouve dans l'océan, l'atmosphère, les plantes, le sol et les combustibles fossiles.

Le carbone circule entre chaque réservoir dans un échange appelé cycle du carbone (fig II.1), qui comporte à la fois des composantes lentes et rapides. Tout changement dans le cycle qui remplace le réservoir de dioxyde de carbone par plus de plongeurs de carbone dans le réservoir. Les changements dans la densité de libération de dioxyde de carbone dans les conditions atmosphériques sont dus à la température plus le volume du terrain.

À long terme, le cycle du dioxyde de carbone est toujours le même que le champ de dioxyde de carbone à part entière dans l'atmosphère ou dans les stocks immobiliers dans les roches. Cet équilibre aide à maintenir la température de la Terre relativement stable, comme un thermostat. [8]

Ce thermostat fonctionne sur quelques centaines de milliers d'années, dans le cadre du cycle lent du carbone. Cela signifie que pendant des périodes plus courtes - des dizaines à des centaines de milliers d'années - la température de la Terre peut varier. Et, en fait, la Terre oscille entre des périodes glaciaires et des périodes interglaciaires plus chaudes sur ces échelles de temps.

Certaines parties du cycle du carbone peuvent même amplifier ces changements de température à court terme. [8]

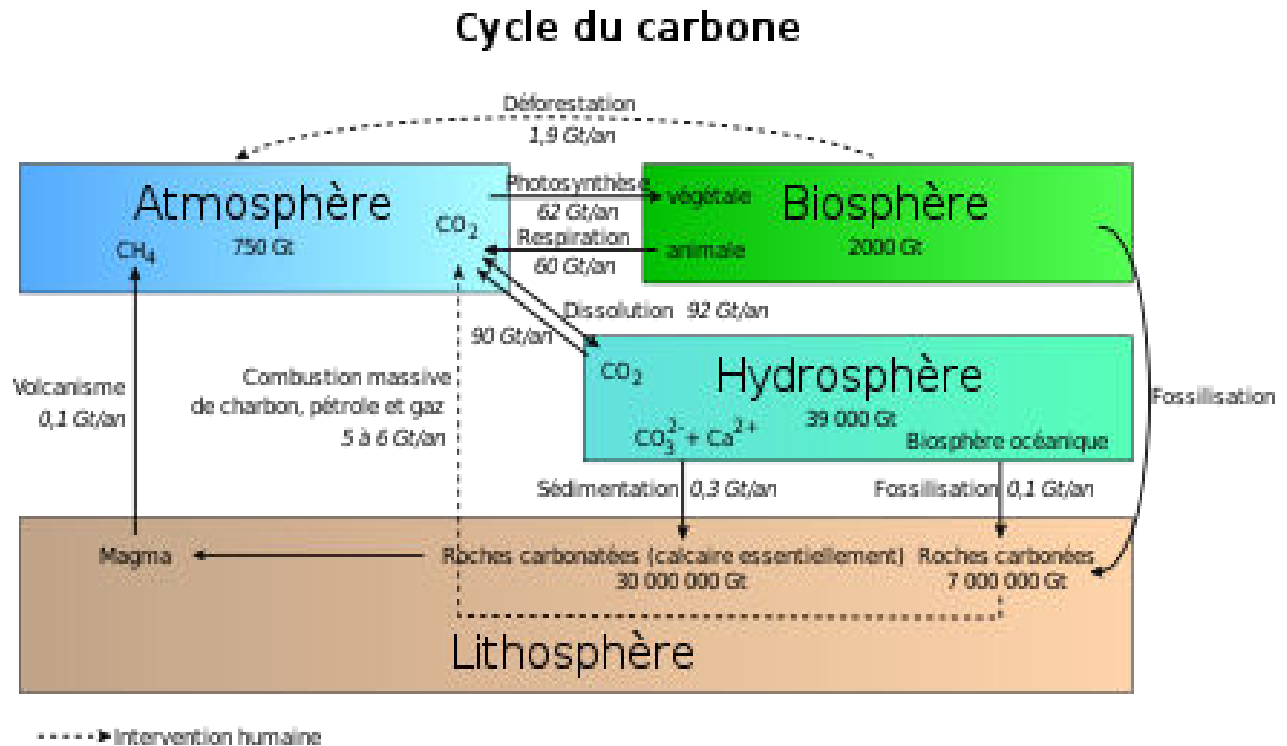


Figure II.1 Cycle du carbone [8]

#### II.4. Le cycle lent du carbone:

Grâce à une série de réactions chimiques et d'activités tectoniques, le carbone met entre 100 et 200 millions d'années pour se déplacer entre les roches, le sol, les océans et l'atmosphère dans le cycle lent du carbone, passant en moyenne 10<sup>13</sup> à 10<sup>14</sup> grammes (10 à 100 millions de tonnes métriques) de carbone provenant du cycle lent du carbone chaque année. En comparaison, les émissions humaines de carbone dans l'atmosphère s'élèvent à 10<sup>15</sup> grammes, tandis que le cycle rapide du carbone déplace 10<sup>16</sup> grammes de carbone par an.

Pendant les pluies, le mouvement du carbone de l'atmosphère vers la lithosphère (roches) commence. Le carbone dans l'atmosphère se combine avec l'eau pour former de l'acide carbonique faible qui tombe à la surface. L'acide dissout les roches - un processus appelé altération chimique - pour libérer des ions calcium, magnésium, potassium ou sodium. Les rivières transportent des ions vers l'océan. [8]

Cependant, le cycle lent du carbone a aussi une composante un peu plus rapide : l'océan. A la surface, là où l'air rencontre l'eau, le dioxyde de carbone se dissout dans l'océan et s'en échappe



en échange constant avec l'atmosphère. Une fois dans l'océan, le dioxyde de carbone réagit avec les molécules d'eau pour libérer de l'hydrogène, ce qui rend l'océan plus acide. L'hydrogène réagit avec les carbonates provenant de l'altération des roches pour produire des ions bicarbonate.

Avant l'ère industrielle, la libération de dioxyde de carbone par l'océan dans l'atmosphère était en équilibre avec le carbone que les océans recevaient lors du creusement des roches. Mais maintenant, avec l'augmentation des concentrations de carbone dans l'atmosphère, l'océan absorbe désormais plus de carbone de l'atmosphère qu'il n'en libère. Sur une longue période, l'océan absorbera jusqu'à 85 % du carbone supplémentaire que les gens libèrent dans l'atmosphère en brûlant des combustibles fossiles, mais le processus est lent car il est lié au mouvement de l'eau de la surface de l'océan vers sa surface. [8]

Pendant ce temps, les vents, les courants et la température contrôlent la vitesse à laquelle l'océan absorbe le dioxyde de carbone de l'atmosphère. Il est possible que les changements dans les températures et les courants océaniques aient aidé à éliminer le carbone de l'atmosphère, puis à le restaurer au cours des derniers millénaires, au début et à la fin des âges de glace. [9]

### **II.5. Le cycle rapide du carbone:**

Le temps qu'il faut pour le carbone est mesuré dans le cycle rapide du carbone de la vie. Le cycle rapide du carbone est le mouvement du carbone à travers l'utilisation de la vie sur terre ou dans la biosphère. Chaque année, entre 1015 et 1017 grammes (1 000 à 100 000 millions de tonnes) de carbone passent par le cycle rapide du carbone.

Le carbone joue un rôle vital en biologie car il peut créer de nombreuses liaisons - jusqu'à quatre atomes - à partir d'une variété apparemment infinie de molécules complexes. On trouve également que de nombreux atomes organiques contiennent des atomes de carbone qui forment des liaisons fortes avec d'autres atomes de carbone liés les uns aux autres par de longues chaînes et des cycles. Les chaînes et bracelets en carbone sont à la base des cellules vivantes. Par exemple, l'ADN se compose de deux molécules enroulées qui se forment autour d'une chaîne carbonée. [8]

Les liaisons des longues chaînes de carbone sont pleines d'énergie. Lorsque les chaînes sont brisées, l'énergie stockée est libérée, ce qui fait des molécules de carbone une excellente source de carburant pour tous les êtres vivants. [8]

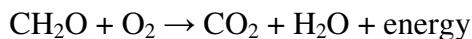
Les plantes et le phytoplancton sont les principaux composants du cycle rapide du carbone. Le phytoplancton (les plus petits organismes des océans) et les plantes absorbent le dioxyde de carbone de l'atmosphère en le poussant dans leurs cellules. En utilisant l'énergie solaire, les plantes

et le plancton incluent du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et de l'eau pour fabriquer du sucre (CH<sub>2</sub>O) et de l'oxygène. La réaction chimique ressemble à ceci :



Quatre choses peuvent se produire pour déplacer le carbone d'une plante et le renvoyer dans l'atmosphère, mais toutes impliquent la même réaction chimique :

- Les plantes décomposent le sucre pour obtenir l'énergie dont elles ont besoin pour pousser.
- Les animaux (y compris les humains) mangent les plantes ou le plancton et décomposent le sucre végétal pour obtenir de l'énergie.
- Les plantes et le plancton meurent et se décomposent (sont mangés par des bactéries) à la fin de la saison de croissance.
- Ou le feu consume les plantes. Dans chaque cas, l'oxygène se combine avec le sucre pour libérer de l'eau, du dioxyde de carbone et de l'énergie. La réaction chimique de base ressemble à ceci :



Dans les quatre processus, il se termine toujours par du dioxyde de carbone libéré lors de la réaction dans l'atmosphère. Le cycle rapide du carbone est étroitement lié à la vie végétale, de sorte que le dioxyde de carbone change dans l'atmosphère à partir de laquelle nous pouvons voir la saison de croissance. Pendant l'hiver de l'hémisphère nord, lorsque peu de plantes terrestres poussent et que beaucoup se décomposent, les concentrations atmosphériques de dioxyde de carbone augmentent. Au printemps, lorsque les plantes recommencent à pousser, les concentrations chutent. C'est comme si la Terre respirait.

## **II.6. Effets du changement du cycle du carbone:**

Tout cet excès de carbone doit aller quelque lieu. À ce jour, les plantes terrestres et marines ont capté environ 55 % du carbone supplémentaire libéré par l'homme, et environ 45 % reste dans l'atmosphère.

À la fin du cycle, la majeure partie du dioxyde de carbone sera absorbée par la surface de la Terre et les océans, mais jusqu'à 20 % peuvent rester dans l'espace pendant quelques milliers d'années. Les modifications du cycle du carbone affectent l'ensemble du bassin de stockage de l'eau. L'augmentation du carbone dans l'atmosphère provoque le réchauffement de la planète et fait

que les plantes sur Terre poussent plus vite et plus fort. Avoir trop de carbone dans la mer rend l'eau très acide, mettant en danger la vie marine.

### **II.6.1 L'atmosphère:**

Le dioxyde de carbone est le gaz le plus important pour contrôler la température de la Terre, il est donc nécessaire qu'une quantité importante de dioxyde de carbone reste dans l'atmosphère. Le dioxyde de carbone, le méthane et les halocarbures absorbent et libèrent une large gamme d'énergie (gaz à effet de serre) et d'énergie infrarouge (thermique) de la Terre. L'énergie réémise voyage dans toutes les directions, dont une partie retourne vers la Terre, où elle chauffe la surface.

Sans gaz à effet de serre, la Terre gèlerait à 18°C. En raison de la forte teneur en gaz à effet de serre, la Terre devient comme Vénus et l'atmosphère de la serre maintient une température d'environ 400 degrés Celsius.

### **II.6.2 L'océan:**

Environ 30 % du dioxyde de carbone émis par l'homme est rejeté dans les océans par des réactions chimiques directes. La fonte du dioxyde de carbone dans la mer crée de l'acide carbonique, ce qui augmente l'acidité de l'eau. Ou plutôt, une mer légèrement alcaline devient légèrement alcaline. Depuis 1750, le pH de surface a chuté de 0,1, soit une variation de 30 % de l'acidité. L'acidification des océans affecte les organismes marins de deux manières. Premièrement, l'acide carbonique se combine avec les ions carbonate dans l'eau pour former du bicarbonate. Cependant, ces mêmes ions carbonate sont ce dont les animaux qui forment des coquilles comme le corail ont besoin pour fabriquer des coquilles de carbonate de calcium. Puisque moins de carbonate est disponible, les animaux devraient utiliser plus d'énergie pour construire leur coquille. En conséquence, les coquilles deviennent finalement plus petites et plus faibles.

Deuxièmement, lorsque l'eau est plus acide, il est préférable de dissoudre le carbonate de calcium. Au fil du temps, cette réaction permettra à l'océan d'absorber l'excès de dioxyde de carbone, car l'eau acide fera fondre plus de roches, libérera plus d'ions carbonate et augmentera la capacité de la mer à absorber le dioxyde de carbone. Cependant, l'eau acide va dissoudre les coquilles carbonatées des organismes marins, les rendant poreuses et fragiles. Les mers chaudes - un produit de l'effet de serre - peuvent réduire l'abondance du phytoplancton, qui pousse mieux

dans les eaux fraîches et riches en nutriments. Cela peut réduire la capacité de l'océan à absorber le carbone de l'atmosphère grâce à un cycle du carbone plus rapide. [9]

### **II.6.3 La terre:**

Les plantes sur terre absorbent environ 25% du dioxyde de carbone émis par les humains. La quantité de dioxyde de carbone émise par les plantes varie d'une année à l'autre, mais en général, les usines du monde ont augmenté leurs émissions de dioxyde de carbone depuis 1960. Seule une partie de cette augmentation est produite en conséquence directe de l'huile minérale, émission de dioxyde de carbone. [8]

Comme le dioxyde de carbone supplémentaire trouvé dans l'atmosphère a été converti en plantes lors de la photosynthèse, les plantes ont pu se développer de manière significative. Cette croissance croissante est appelée fertilisation carbonée. Les modèles prédisent que les plantes peuvent croître de 12 à 76 % si le dioxyde de carbone dans l'atmosphère est doublé, tant qu'il n'y a rien d'autre, comme un manque d'eau, qui empêche leur croissance. Cependant, les scientifiques ne savent pas dans quelle mesure le dioxyde de carbone augmente la croissance des plantes dans le monde réel, car les plantes ont besoin de plus que du dioxyde de carbone pour se développer.

Les plantes ont aussi besoin d'eau, de soleil, de nutriments et surtout d'azote. Si une plante manque de l'une de ces choses, elle ne poussera pas, peu importe le nombre d'autres besoins. Il y a une limite à la quantité de carbone que les plantes peuvent émettre de l'atmosphère, et cette limite varie d'une région à l'autre. À ce jour, les engrais au dioxyde de carbone semblent augmenter la croissance des plantes jusqu'à ce que la plante atteigne la limite de la quantité d'eau ou d'azote disponible. [8]

### **II.7. Effet de serre:**

D'autres activités humaines produisent également des gaz à effet de serre, qui augmentent constamment dans l'atmosphère. Les changements dans l'équilibre des gaz à effet de serre ont des effets importants sur le reste du monde. La combustion de combustibles fossiles et l'abattage et le brûlage d'arbres libèrent de grandes quantités de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Un groupe de gaz à effet de serre appelés chloro-fluorocarbures utilisé pour les aérosols, tels que les bombes aérosols pour cheveux, les réfrigérateurs et la construction de mousses plastiques. À mesure que les gaz à effet de serre augmentent, davantage de chaleur est coupée, ce qui entraîne un réchauffement climatique. C'est ce qu'on appelle le réchauffement climatique. De nombreux scientifiques s'accordent à dire que les produits fabriqués par l'homme ont un effet puissant sur la

chaleur. Si nous continuons à polluer l'atmosphère avec des gaz à effet de serre, il y aura de nombreux effets nocifs sur Terre. Aujourd'hui, la température de la terre augmente rapidement. Pour comprendre la rapidité du réchauffement climatique (fig II.2), considérons que tout au long du XXe siècle, les températures mondiales ont augmenté d'environ 0,6 degrés Celsius. En utilisant des prévisions météorologiques informatisées, les scientifiques estiment que d'ici l'an 2100, la température de la terre augmenterait de 5,4 ° C à 5,8 ° C. [8]

Avec le réchauffement de la Terre, la planète sera plus chaude, ce qui signifie que le climat de toute la Terre changera. Comme notre environnement est propice à la vie, le réchauffement climatique peut être une catastrophe pour nous et pour tout autre être vivant sur Terre. À ce stade, il est difficile pour les scientifiques de prédire l'ampleur des changements et où les pires effets se produiront. [8]

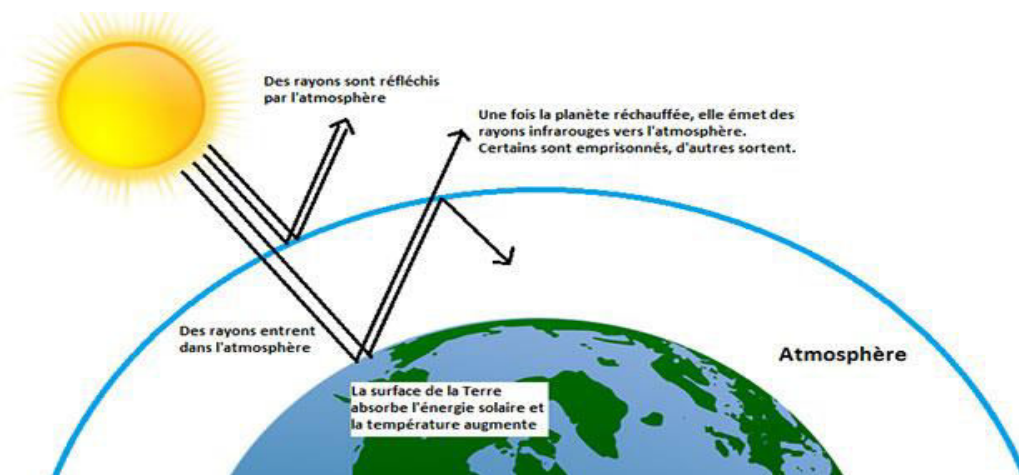


Figure II.2. Effet de serre [8]

### II.8. Le CO<sub>2</sub> et l'effet de serre:

Le dioxyde de carbone est l'un des gaz à effet de serre, le gaz qui absorbe et libère la chaleur émise par la surface de la terre et des océans, qui est émise par les rayons du soleil, l'énergie thermique par rayonnement infrarouge. Contrairement à l'oxygène ou à l'azote (qui forment une grande partie de notre atmosphère), ces gaz absorbent lentement la chaleur et la libèrent au fil du temps, comme des briques dans une cheminée après un incendie.

En l'absence de l'effet naturel du réchauffement climatique, la température annuelle moyenne de la Terre tomberait en dessous de zéro au lieu de 15 degrés Celsius. Mais à mesure que le nombre de gaz à effet de serre augmentait, ce changement a perturbé l'équilibre énergétique de la Terre, piégeant l'excès de chaleur et augmentant la température moyenne de la Terre.

Le dioxyde de carbone est l'un des gaz à effet de serre à long terme les plus importants au monde. Il absorbe moins de chaleur par molécule que les gaz à effet de serre méthane ou protoxyde d'azote, mais il est plus abondant et reste plus longtemps dans l'atmosphère. L'augmentation du dioxyde de carbone dans l'atmosphère est responsable d'environ les deux tiers du déséquilibre énergétique total qui fait augmenter la température de la Terre. [9]

Une autre raison pour laquelle le dioxyde de carbone est si important pour le système terrestre est qu'il fond dans l'océan comme le gaz d'une canette de soda. Il se combine avec les molécules d'eau, produisant de l'acide carbonique et abaissant le pH de l'océan (augmentant son acidité). [9]

### **II.9. Le ciment et la production de gaz CO<sub>2</sub>:**

Le ciment - la plus grande source de décomposition du carbonate - est utilisé comme liant depuis l'Antiquité. Mais ce n'est qu'après la Seconde Guerre mondiale que la production de ciment a augmenté rapidement dans le monde, et les taux de production actuels dans le monde équivalent à une demi-tonne par personne et par an. La production mondiale de ciment a été multipliée par plus de 30 depuis 1950 et presque quatre fois depuis 1990, elle a augmenté beaucoup plus rapidement que la production mondiale de combustibles fossiles au cours des deux dernières décennies. Depuis 1990, cette croissance est due en grande partie à la croissance rapide de la terre, la production de ciment ayant plus que 11 fois augmenté. Deux aspects de la production de ciment entraînent la production de CO<sub>2</sub>. Le premier est la réaction chimique impliquée dans la production du principal composant du ciment, le clinker, car les carbonates (notamment CaCO<sub>3</sub>, présent dans le calcaire) sont décomposés en oxydes (notamment la chaux, CaO) et en CO<sub>2</sub> par transfert de chaleur. [10]

La deuxième source d'émissions de gaz provient de la combustion de combustibles fossiles pour produire l'énergie vitale nécessaire pour chauffer les ingrédients non cuits au-dessus de 1000 ° C, et ces émissions « énergétiques », y compris celles de l'électricité achetée, peuvent ajouter jusqu'à 60 % d'extraction de processus en plus. (AIE, 2016). La quantité émise par l'industrie du ciment peut contribuer jusqu'à 8 % des émissions mondiales de CO<sub>2</sub>. Ces procédés (parfois « industriels » ou « procédés industriels ») et les émissions d'énergie sont souvent rapportés séparément sur la liste globale des produits. [10]

Le Global Carbone Project publie chaque année des estimations des émissions mondiales de CO<sub>2</sub> provenant de l'utilisation de combustibles fossiles et de la production de ciment, et ces estimations sont utilisées par la communauté mondiale de modélisation du carbone dans le cadre

---

de l'élaboration du budget mondial du carbone. Il est donc important que les taux de sortie soient aussi précis que possible. Cette base de données sur les émissions couvre toutes les émissions de CO<sub>2</sub> provenant de l'oxydation (pas seulement la consommation d'énergie) des combustibles fossiles, y compris celles qui se produisent dans le domaine des « procédés industriels et consommation de produits ». Du GIEC, l'installation de ciment permet donc de couvrir la majeure partie du CO<sub>2</sub> émis. [10]

### **II.9.1. La première source de carbone dans l'industrie du ciment:**

La plupart des émissions de ciment dans l'industrie du ciment proviennent des compteurs de calcaire (60-64%) plutôt que de la combustion de carburant. D'autre part, une partie de cette extraction de gaz est absorbée par la boue et le béton en raison de leur carbonatation lors de l'exposition à l'environnement. La chimie de la carbonatation a été révisée dans de nombreux articles. [10]

En bref, la carbonatation est produite parce que le dioxyde de carbone est un gaz dans l'atmosphère qui imprègne le réseau poreux capillaire des bétons et mortiers, où il se dissout dans une solution interstitielle et réagit avec les ions calcium et d'autres composés alcalins produits par la pâte de ciment Portland. Le carbonate de calcium a une très faible solubilité ; puis il court. Quant aux éléments pouzzolaniques présents dans le ciment et le laitier granulé de haut fourneau broyé, ils diminuent la quantité d'hydroxyde de calcium dans le liant du fait de la faible teneur en clinker lors de l'utilisation, mais augmentent la quantité de gel CSH. De plus, ils réduisent le rapport Ca/Si du gel C-S-H. Par conséquent, la quantité d'hydroxyde de calcium pouvant être carbonatée et la composition du gel C-S-H dépendent du type et de la quantité de composants du ciment (cendres volantes, pouzzolane naturelle, laitier granulé de haut fourneau, etc.). De plus, le laitier de haut fourneau contient certains composants qui contribuent à l'absorption du dioxyde de carbone par la pâte de ciment Portland présente dans la boue et le béton. Par conséquent, la carbonatation augmente dans les matériaux cimentaires avec du laitier granulé de haut fourneau broyé en fonction de la teneur en clinker. [10]

### **II.9.2. La deuxième source dans l'industrie du ciment:**

Cette source est un échappement indirect produit par la combustion de combustibles fossiles pour brûler le four. Les incendies sont souvent brûlés avec du charbon, du gaz naturel ou du pétrole, et la combustion de ces combustibles produit plus d'émissions de CO<sub>2</sub>, comme ce serait le cas dans la production d'électricité. Cela représente environ 40 % des émissions. Enfin, l'électricité utilisée pour alimenter les équipements supplémentaires de l'usine et le transport final

---

du ciment représente une autre source d'émissions indirectes de gaz et représente 5 à 10 % de la production de l'industrie. [10]

### **II.10. La réduction du ciment émission CO<sub>2</sub>:**

Le niveau de CO<sub>2</sub> de la capacité de production de ciment - émissions par tonne de production - a chuté de 18 % à l'échelle mondiale au cours des dernières décennies. Cependant, les émissions de carbone du secteur dans son ensemble ont augmenté de façon exponentielle, la demande a triplé depuis 1990.

À ce jour, des progrès ont été réalisés dans trois domaines clés. Premièrement, des blocs de ciment efficaces rendent la production moins efficace. Il peut encore être amélioré :

- La consommation énergétique moyenne mondiale par tonne de ciment est supérieure de 20 % à la production
- Les meilleures technologies et procédures actuellement disponibles.

Deuxièmement, l'utilisation d'autres combustibles a également réduit les émissions de gaz, par exemple en utilisant de la biomasse ou des déchets au lieu du charbon, où environ 43 % de la consommation de combustibles provient désormais de sources alternatives.

Troisièmement, en réduisant la composante clinker Portland du ciment et en réduisant les émissions, le ciment « élevé » peut réduire la pollution jusqu'à quatre kilogrammes. Le clinker peut être remplacé par d'autres matériaux tels que le ciment, qui comprend les déchets de la combustion du charbon et de la fabrication du métal. Cependant, cela peut affecter les structures en béton, il convient donc à certaines utilisations finales. [10]

Malgré la faible contribution à la protection du climat, l'utilisation de béton recyclé dans les zones métropolitaines est recommandée car la démolition et la réutilisation des éléments en béton sur place créent un cycle durable et réduisent les émissions de matériaux non mûrs. Dans les régions où la densité de construction est très faible, il est nécessaire d'évaluer l'impact du transport du matériau de béton concassé d'un site de démolition éloigné sur l'équilibre naturel. L'augmentation des émissions de gaz peut augmenter le climat. De nouvelles avancées dans le broyage du ciment pourraient se produire à l'avenir, où la concentration de la teneur en ciment pourrait avoir un impact significatif sur la protection du climat. [11]



**II.11. Les méthodes de réduction d'émission de CO<sub>2</sub> dans l'industrie du ciment:**

Il existe plusieurs solutions techniques pour réduire les émissions de gaz à effet de serre lors de la plupart des étapes de production du ciment, et nous pouvons les résumer avec les stratégies suivantes :

**II.11.1. Substitution matérielle:**

Fondamentalement, trois stratégies de commutation peuvent être divisées :

- Remplacement du béton comme matériau de construction
- Réduction de la quantité de ciment dans le béton
- Réduction du composant de clinker dans le ciment

Le ciment ne peut pas être complètement remplacé en tant que matériau de construction, en raison de l'expansion des applications et des structures en béton, mais des matériaux respectueux du climat peuvent être utilisés dans la mesure du possible, par exemple dans la protection contre les incendies et les systèmes à courant faible. Le bois est une bonne alternative comme matériau de construction. Le bois est un matériau recyclable et donc respectueux du climat, tant qu'il est cultivé de manière continue et régionale et utilisé en cascade. Outre le remplacement complet du béton, d'autres solutions sont également adaptées pour réduire l'utilisation du béton, tels que les composites et les nouveaux types de renforts à haute résistance, comme le carbone ou le béton léger à haute teneur en air. Bien que ces nouveaux types de structures en béton puissent contribuer à la protection du climat, certains aspects de la durabilité n'ont pas été abordés, par exemple (reconstruction). [10]

Le ciment et le béton résistant aux intempéries doivent être utilisés dans d'autres cas où le béton ne peut pas être remplacé, comme la construction de tunnels, les travaux de fondation et les bâtiments avec des exigences statiques élevées. La présence de béton et de ciment peut être réduite principalement en réduisant la teneur en clinker. Cela peut être fait en réduisant la part de ciment dans le mélange de béton et pas seulement la part de clinker dans le ciment, il existe également d'autres matériaux immatures (secondaires) qui ont les mêmes propriétés chimiques et physiques. Les mêmes résultats peuvent être obtenus en les additionnant. L'ajout de ces matériaux permet une réduction significative des émissions de gaz à effet de serre du ciment. Cependant, 81 % des cendres volantes de charbon qui en résultent sont effectivement utilisées dans la production de béton et de ciment. En raison de la transformation en cours du secteur de l'énergie et des futures

émissions de CO<sub>2</sub> liées à la production de fer, la disponibilité de cette matière première devrait continuer à diminuer. [11]

**Tableau. II.1 : Les facteurs d'émission CO<sub>2</sub> par rapport carburant [11]**

Le carburant	Facteurs d'émission CO <sub>2</sub> (kg CO <sub>2</sub> /Gj)
Charbon	105.1
Pétrole	76.4
Gaz	55.9
Alternatif carburant	44.2
Biomasse	37.2

### II.11.2. Efficacité énergétique et substitution de carburant:

En plus de bonnes performances au niveau du produit, les processus de production peuvent également être améliorés. Il est largement exploité pour des raisons autres que la protection du climat. L'électricité est nécessaire dans le processus de production de ciment pour divers petits processus, par ex. pour le broyage et le broyage des matières premières et des produits finis, pour les processus de transfert et de mélange internes et dans un four rotatif. Afin d'augmenter encore l'efficacité, les dernières technologies (par exemple, des moteurs électriques plus efficaces, etc.) doivent toujours être utilisées et les installations plus anciennes doivent être remplacées en conséquence. La production de ciment conventionnel nécessite une température très élevée (1 450 °C), ce qui entraîne de fortes émissions de GES lors de la combustion de combustibles minéraux. Les mesures de réussite sont donc particulièrement utiles lors de l'utilisation d'énergie chaude. Il s'agit notamment de l'utilisation de la chaleur perdue et du bruit d'échappement (par exemple, la conversion de la chaleur en électricité) et des améliorations du four rotatif (récupération de chaleur, préchauffage, pré-calcul, utilisation de la chaleur rayonnante). [11]

Le clinker de ciment est chauffé avec du calcaire pour être calciné. Ce relâchement est inévitable tant que le ciment est utilisé au moins partiellement comme liant. Pour empêcher ces émissions et les combustibles fossiles de diriger l'énergie dans l'atmosphère et d'endommager le climat, il est possible de capturer et de stocker le CO<sub>2</sub> dans le dioxyde de carbone ou d'autres

industries. Les gaz résiduaux de la production de ciment en contiennent environ 14 à 33 % de CO<sub>2</sub>. Pour l'entretenir ou l'utiliser, il est nécessaire d'en maintenir une concentration aussi élevée que possible. Diverses méthodes existent à cette fin, par exemple. Stratégies post-incendie. Le plus prometteur à l'heure actuelle est le procédé oxycombustible, ainsi que le procédé à boucle de calcium, qui a déjà été testé et développé dans diverses usines expérimentales et de recherche.

### **II.11.3. Carbonatation des matières premières minérales :**

La carbonatation est un processus naturel dans les formations rocheuses. Ce processus est accéléré dans les applications industrielles, où le CO<sub>2</sub> capturé réagit avec la roche décomposée ou les résidus industriels, par ex. scories ou cendres volantes. Les carbonates et silicates ainsi obtenus constituent une matière première intéressante pour l'industrie de la construction et du ciment. L'avantage de cette méthode est la fixation permanente du CO<sub>2</sub> dans les matériaux de construction. [10]

### **II.11.4. Valorisation biologique:**

Le CO<sub>2</sub> capté peut également servir de nutriment pour les micro-organismes, qui utilisent la photosynthèse pour le métaboliser en oxygène et en biomasse. La biomasse est utilisée pour les compléments alimentaires, les matières de base de l'industrie chimique, pharmaceutique, cosmétique, comme additif pour l'agriculture ou utilisée pour la production d'énergie. [10]

### **II.11.5. Dérivés chimiques et gaz de synthèse:**

Grâce à divers processus chimiques (synthèse), le CO<sub>2</sub> peut également être utilisé comme matériau de base pour l'industrie chimique. Des exemples de dérivés chimiques potentiels sont l'urée, les carbonates inorganiques ou le formaldéhyde. La pureté du CO<sub>2</sub> est particulièrement importante pour son utilisation chimique ultérieure, ce qui rend nécessaire une purification supplémentaire des gaz d'échappement. En utilisant le CO<sub>2</sub> comme matériau de base chimique, la dépendance de l'industrie chimique vis-à-vis des matières premières fossiles peut être réduite ou surmontée. Une réduction des gaz à effet de serre dans le secteur de la fabrication de produits chimiques est également possible à condition que des sources d'énergie renouvelables soient utilisées pour une production neutre en CO<sub>2</sub>. [12]

### **Conclusion :**

Le ciment est reconnu pour ses avantages environnementaux importants en soutenant un développement durable créatif et efficace. En réponse aux forces environnementales et

économiques croissantes, les régulateurs, les ingénieurs, les développeurs et les propriétaires recherchent des solutions efficaces, innovantes et pratiques qui préservent les ressources non renouvelables. Lorsque l'on considère l'impact environnemental des matériaux de construction - extraction, production, construction, exploitation, démolition et recyclage - le ciment est l'option la plus avantageuse pour atteindre ces objectifs. Par conséquent, les demandes mondiales de réglementation des émissions de la production de ciment augmentent avec la croissance de ces gaz polluants. Les chercheurs ont fait divers efforts pour trouver des alternatives qui peuvent réduire considérablement la consommation d'énergie élevée et les impacts environnementaux au cours du processus de fabrication du ciment.

**CHAPITRE III :**  
**Calculs et déterminations**  
**du quantités de CO<sub>2</sub> émises**

**INTRODUCTION**

La production de ciment est l'une des plus grandes sources anthropiques de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et il y a une pression sur l'industrie du ciment pour réduire ces émissions. Afin de réduire les émissions de CO<sub>2</sub>, il est nécessaire de réaliser des méthodes pour l'identifier, et évaluer systématiquement.

Les émissions de CO<sub>2</sub> et la quantité de clinker dans le ciment varient considérablement. En l'absence de source disponible de données sur la production de clinker pour tous pays, d'autres options doivent être envisagées. L'utilisation directe des données de production de ciment sans ajustement pour les ratios de clinker qui varient selon les pays et dans le temps, ou pour le commerce du clinker, conduit à de mauvaises estimations des émissions, et devrait donc être utilisé qu'en dernier recours.

L'industrie du ciment subit une pression croissante pour réduire ses émissions de CO<sub>2</sub>. Au cours de la dernière décennie.

La production de ciment en Algérie a été multipliée par 27 depuis l'indépendance à ce jour, passant de 1,5 million de tonnes/an seulement en 1962, à plus de 40 millions de tonnes actuellement, une évolution remarquable mais qui reste en deçà des besoins sans cesse grandissants du marché, et aussi multipliée le volume d'émission de CO<sub>2</sub>.

- Dans notre travail nous avons calculé la quantité de CO<sub>2</sub> émis par le four N°02 de BISKRIA CIMENT a une production de 6000 Tonnes de Clinker /jour.
- Comme nous l'avons mentionné dans le chapitre 1, la compagnie BISKRIA CIMENT SPA utilise quatre matières premières essentiels (Calcaire 80%, Argile 17%, Fer 2%, Sable 1%).
- La source principale de CO<sub>2</sub> c'est la décarbonations des carbonates de calcium CaCO<sub>3</sub> et Carbonate de Magnésium MgCO<sub>3</sub>, les deux composées se trouvent dans les quatre matières premières avec des proportions différentes, mais pour faciliter le travail nous avons considéré les Analyses chimique directement à partir du mélange qui alimente le four (Farine Cru).
- La deuxième source de CO<sub>2</sub> c'est la combustion de Gaz Naturel qui est utilisé comme le carburant principale dans la cuisson.
- Le gaz naturel injecté en deux étapes :
  1. 1<sup>er</sup> étape : la décarbonatation (calcination) dans pré-calcinateur, la réaction de décarbonatation de CaCO<sub>3</sub> et MgCO<sub>3</sub> c'est une réaction fortement endothermique elle a

besoin d'énergie, la photo (fig III.1) montre le procédé de cuisson et l'opération de décarbonatation.

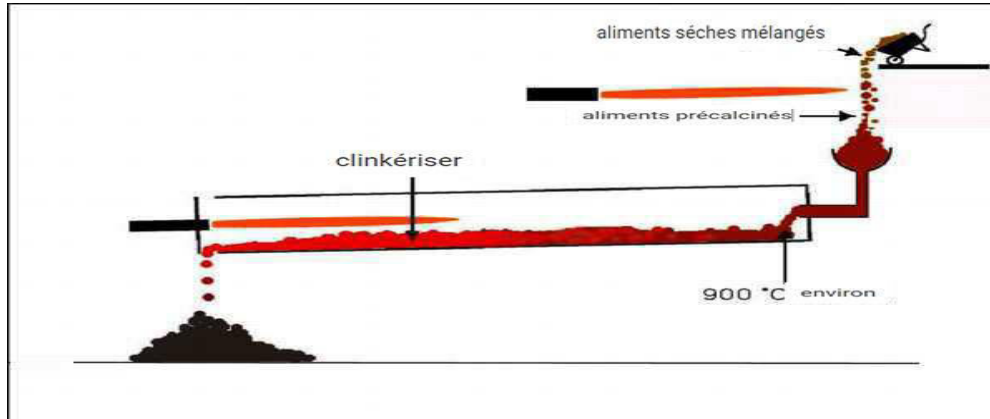


Figure III.1 : La procédé de décarbonatation. [12]

2. Deuxième étape : c'est la Clinkérisation, après la décarbonatation et décomposition des oxydes ( $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), on démarre l'opération de Clinkérisation à l'aide du bruleur principal (fig III.2).

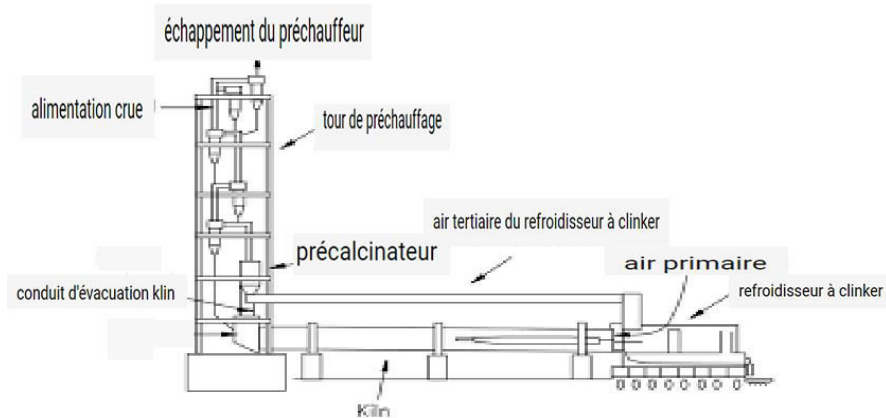
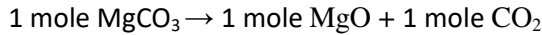
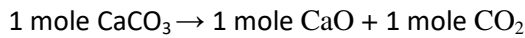
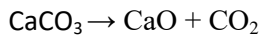


Figure III.2 : procédé de la cuisson. [12]

### III.1. La source n°1 d'émission de CO<sub>2</sub> (la décarbonatation):

- Pour la décarbonatation nous avons les deux équations suivantes :



- Pour calculer la quantité de CO<sub>2</sub> émis par ces réactions on détermine le nombre de mole et le masse moléculaire.

$$n_{\text{CO}_2} = \frac{m_{\text{CO}_2}}{M_{\text{CO}_2}}$$

n : nombre de mole ( mole)

m : la masse ( g)

M : la masse moléculaire (g/mol)

M<sub>CO<sub>2</sub></sub> = 44 g/mol

L'amélioration d'un procédé de combustion spécifique n'entraîne pas ou très peu de changement dans la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>, mais le passage d'un procédé par voie humide à un procédé par voie sèche avec préchauffage et fours de précalcination peut entraîner une amélioration significative. [12]

### III.1.2. Détermination de pourcentage de CaCO<sub>3</sub> et MgCO<sub>3</sub>:

Pour déterminer les deux carbonates on peut calculer a partir des pourcentage de CaO et MgO dans la farine par analyse XRF.

#### III.1.2.1. Détermination du % de CaCO<sub>3</sub> :

Le carbonate de calcium se présente sous la forme d'une poudre blanche, de cristaux inodores ou incolores. Il ne dissout pas dans l'eau. Il se compose principalement sur les rochers du monde entier. Le carbonate de calcium broyé résulte directement de l'extraction du calcaire. Le processus d'extraction maintient le carbonate très proche de son état de pureté d'origine et fournit un produit raffiné sec ou boueux. Le carbonate de calcium précipité est produit industriellement par la décomposition du calcaire en oxyde de calcium suivie d'une extraction ultérieure du carbone ou en tant que produit du procédé Solvay (utilisé pour fabriquer du carbonate de sodium). Le carbonate de calcium précipité est plus pur que le carbonate de calcium broyé et possède des propriétés distinctes (et flexibles).



- Pour déterminer le pourcentage de CaCO<sub>3</sub> :

$$M_{\text{CaO}} \rightarrow M_{\text{CaCO}_3}$$

$$\text{CaO \%} \rightarrow X$$

$$X = \frac{\text{CaO \%} \cdot M(\text{CaCO}_3)}{M_{\text{CaO}}}$$

$$M_{\text{CaCO}_3} = 100 \text{ g/mol}$$

$$M_{\text{CaO}} = 56.07 \text{ g/mol}$$

### III.1.2.2. Détermination du % de MgCO<sub>3</sub> :

Le carbonate de magnésium est un carbonate qui contient un ion magnésium bien chargé et un ion carbonate fort, Le MgCO<sub>3</sub> se trouve principalement dans la magnésite minière, La magnésite est un type de MgCO<sub>3</sub>, La magnésite est un minéral qui se présente sous la forme d'un blanc ou d'un gris cristallin, La magnésite est un type de roche flexible riche en magnésium.

- Pour déterminer le pourcentage de MgCO<sub>3</sub> :

$$M_{\text{CaO}} \rightarrow M_{\text{MgCO}_3}$$

$$\text{MgO \%} \rightarrow X$$

$$X = \frac{\text{CaO \%} \cdot M(\text{MgCO}_3)}{M_{\text{CaO}}}$$

$$M_{\text{CaCO}_3} = 100 \text{ g/mol}$$

$$M_{\text{MgO}} = 40 \text{ g/mol}$$

- Les moyennes des analyses de CaO et MgO et les carbonates CaCO<sub>3</sub> et MgCO<sub>3</sub> calculés durant 5 jours sont mentionnés dans le tableaux suivant :

**Tableau. III.1 : Pourcentage de CaCO<sub>3</sub> et MgCO<sub>3</sub> et CaO et MgO**

jour	CaO (%)	MgO (%)	CaCO <sub>3</sub> (%)	MgCO <sub>3</sub> (%)
01-avr	42,12	1,88	75,12%	4,67%
02-avr	42,49	1,79	75,78%	4,44%
03-avr	42,33	1,78	75,49%	4,42%
04-avr	42,28	1,7	75,41%	4,22%
05-avr	42,21	1,7	75,28%	4,22%

Après avoir observé les proportions variables des composants de la farine, où le composant CaCO<sub>3</sub> est le plus abondant, Il apparait clairement que sa combustion est la première cause d'émission de CO<sub>2</sub> pour la première source.

**III.1.3. Calculs du débit massique de CaCO<sub>3</sub> et MgCO<sub>3</sub> :**

Après avoir obtenu les variables requises sur le débit de masse par heure de farine pour le four n°2 (pendant 5 jours), qui est utilisé dans la production du clinker, on a utilisé ces statistiques pour calculer les débits massiques de CaCO<sub>3</sub> et MgCO<sub>3</sub> comme indiqué dans le tableau ci-dessous :

**Tableau. III.2 : Les débits massiques de CaCO<sub>3</sub> et MgCO<sub>3</sub>**

Jour	Débit farine T/h	Facteur	Débit kk T/h	Alim farine T/jour	CaCO <sub>3</sub> T/h	MgCO <sub>3</sub> T/h
01-avr	465	1,65	281,82	11160	349,31	21,69
02-avr	453	1,65	274,55	10872	343,28	20,12
03-avr	449	1,65	272,12	10776	338,97	19,83
04-avr	449	1,65	272,12	10776	338,57	18,94
05-avr	459	1,65	278,18	11016	345,54	19,36

**III.1.4. Calcul des émissions totales de la première source de CO<sub>2</sub>:**

Avec la détermination de débit massique de chaque carbonate (CaCO<sub>3</sub> et MgCO<sub>3</sub>), on peut calculer le CO<sub>2</sub> total qui est émit par la décarbonation, on commence ce procède par déterminer le

nombre de moles dans le débit massique partiel de carbonates, après ces déterminations on calcul les quantités de CO<sub>2</sub> par cette équation :

$$\text{Débit Masse CO}_2 \frac{\text{g}}{\text{h}} = \frac{n \text{ CO}_2 \left( \frac{\text{Mol}}{\text{h}} \right)}{M \text{ CO}_2 \left( \frac{\text{Mol}}{\text{g}} \right)}$$

**Tableau. III.3 : Les masses de CO2 (décarbonations)**

Jour	CaCO3 g/h	MgCO3 g/h	Mol CO2/h CaCO3	Mol CO2/h MgCO3	Quantité CO2 g/h a partir CaCO3	Quantité CO2 g/h a partir MgCO3	CO2 Total (T)
01-avr	349.3*(10 <sup>6</sup> )	21.6*(10 <sup>6</sup> )	349*(10 <sup>6</sup> )	25.7*(10 <sup>6</sup> )	153.5*(10 <sup>6</sup> )	11.3*(10 <sup>6</sup> )	164,92
02-avr	343.2*(10 <sup>6</sup> )	20.1*(10 <sup>6</sup> )	342.9*(10 <sup>6</sup> )	23.8*(10 <sup>6</sup> )	150.9*(10 <sup>6</sup> )	10.5*(10 <sup>6</sup> )	161,45
03-avr	338.9*(10 <sup>6</sup> )	19.8*(10 <sup>6</sup> )	338.6*(10 <sup>6</sup> )	23.5*(10 <sup>6</sup> )	149*(10 <sup>6</sup> )	10.3*(10 <sup>6</sup> )	159,40
04-avr	338.5*(10 <sup>6</sup> )	18.9*(10 <sup>6</sup> )	338.2*(10 <sup>6</sup> )	22.4*(10 <sup>6</sup> )	148.8*(10 <sup>6</sup> )	9.8*(10 <sup>6</sup> )	158,76
05-avr	345.5*(10 <sup>6</sup> )	19.3*(10 <sup>6</sup> )	345.2*(10 <sup>6</sup> )	22.9*(10 <sup>6</sup> )	151.9*(10 <sup>6</sup> )	10.1*(10 <sup>6</sup> )	162,04

- **Remarque :** à partir des débits de carbonates et de CO<sub>2</sub> durant les cinq jours Nous concluons que pour produit 1 kg de clinker, le four n°2 rejette 0.58 kg de CO<sub>2</sub> seulement par la décarbonation.

**III.2. Le source n°2 d'émission de CO2 (par combustion du GNL) :**

**III.2.1. Définition de GNL:**

Le gaz naturel liquéfié (GNL) est du gaz naturel qui a été converti sous forme liquide pour faciliter et sécuriser le transport du gaz naturel. Le gaz naturel est refroidi à environ -162,222 °C, ce qui donne un liquide clair, incolore et non toxique qui peut être transporté des zones contenant une grande quantité de gaz naturel vers des zones nécessitant plus de gaz naturel.

À l'état liquide, le gaz naturel occupe 1/600 de l'espace, ce qui signifie que le gaz naturel rétrécit 600 fois, ce qui facilite grandement son transport et son stockage lorsque le transport par pipeline n'est pas possible. Avec l'augmentation de la consommation mondiale d'énergie, les experts prédisent que le commerce du GNL deviendra plus important, Sa composition (qui varie d'une réserve à l'autre) est toujours principalement constituée de méthane (CH<sub>4</sub>). Le gaz naturel contient également de l'éthane (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>), du propane (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>), du butane (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>), et du CO<sub>2</sub>. [13]

**III.2.1.1. Avantages de l'utilisation du GNL dans la cimenterie :**

Par rapport aux énergies traditionnelles, l'utilisation du gaz naturel présente des avantages non négligeables, notamment :

- Dépenses en capital réduites. Les investissements sont moins cela résulte de la mise au rebut d'une grande partie de l'équipement (réservoirs et parc d'engraisement; équipement

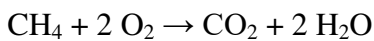
de médicaments - broyeur pour le charbon, réchauffeur pour la peinture à l'huile énergétique - utilisation de plus simple et moins précieuse).

- Réduction des coûts d'exploitation, les frais de stockage sont nuls, le gaz étant utilisé tel quel.
- Coûts de main-d'œuvre réduits par rapport aux énergies solides, il y a des économies importantes en termes de déchargement, de manutention, de broyage, etc. Par rapport aux énergies liquides, les économies sont moindres (réchauffage du poste de conduite de la chaudière).
- Réduction des coûts de conservation L'utilisation du gaz permet d'exclure les coûts de puisage des brûleurs qui ne viennent pas s'encrasser. La détérioration des réfractaires du four est importante plus lente.

### III.2.2. La composition de GNL :

#### ➤ Méthane (CH<sub>4</sub>) :

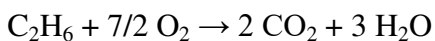
Le méthane est l'hydrocarbure le plus simple, composé d'un atome de carbone et de quatre atomes d'hydrogène. Le méthane est inflammable et est utilisé comme combustible dans le monde entier. C'est un composant principal du gaz naturel (83.5% pour le gaz utilisé dans le four n°2). La combustion du méthane en présence d'oxygène libère du dioxyde de carbone et de la vapeur d'eau:



#### ➤ Ethane (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>):

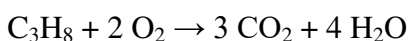
L'éthane est un hydrocarbure saturé présent à l'état gazeux. L'éthane est le deuxième alcane le plus simple suivi du méthane. Il contient 2 atomes de carbone et 6 atomes d'hydrogène.

L'apparition d'éthane est de 7.6 % dans le gaz naturel, La combustion de l'éthane produit le CO<sub>2</sub> et de la vapeur d'H<sub>2</sub>O :



#### ➤ Propane (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>) :

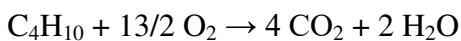
Le propane est un hydrocarbure gazeux incolore et liquéfié (un composé de carbone et d'hydrogène), et c'est le troisième élément de la série des paraffines après le méthane et l'éthane. La formule chimique du propane est C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, Il est séparé en grande quantité du gaz naturel et représente 2.1% de volume total de GNL usée, La combustion du propane produit aussi le CO<sub>2</sub> et de la vapeur d'H<sub>2</sub>O :



➤ **Butane (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>) :**

Le butane est un gaz incolore avec une légère odeur de pétrole. Il est expédié sous forme de gaz liquéfié sous pression de vapeur. Il s'enflamme facilement. Ses vapeurs sont plus lourdes que l'air.

Comme le propane, le butane provient du gaz naturel ou des raffineries de pétrole et les deux gaz se retrouvent généralement ensemble, Les résultats de l'équation de combustion sont similaires au reste des alcanes en termes de molécules avec une différence dans la quantité :



➤ **Dioxyde de carbone CO<sub>2</sub> :**

Le GNL contient également du dioxyde de carbone, mais il n'est présent qu'en très faible quantité (0.2% du volume total)

**III.2.3. Calcul les émissions totales de la deuxième source de CO<sub>2</sub>(GNL):**

Le four n°2 est alimenté en gaz naturel par deux tubes. Le premier à alimenter la flamme de pré-calcination, le deuxième pour alimenter la flamme de Clinkérisation, le débit dans les deux tubes et la somme en litre par heure définie dans le tableau ci-dessous :

**Tableau. III.4 : Les débit de gaz GNL injecté**

Jour	GAZ Principale m <sup>3</sup> /h	GAZ Précal m <sup>3</sup> /h	TOTAL Litre/h
01-avr	1311	1705,78	3016780
02-avr	1335	1669,83	3004830
03-avr	1323	1675,09	2998090
04-avr	1349	1655,15	3004150
05-avr	1371	1726	3097000

- Avec le calcul du volume total de GNL usée, nous pouvons déterminer le nombre de moles de chaque composant de GNL selon l'équation suivante :

Si :



$$\text{Nombre de mol réactif} = \frac{\text{Volume TOTAL (GNL)} * \text{Molécule \%}}{22.7}$$

- Le tableau ci-dessous indique le nombre de moles de chaque composé :

**Tableau. III.5 : Les nombres de moles du composés de GNL**

Jour	Nombre de mol Réactif				
	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	CO <sub>2</sub>
01-avr	112455,86	10235,50	2828,23	1346,78	269,36
02-avr	112010,40	10194,96	2817,03	1341,44	268,29
03-avr	111759,16	10172,09	2810,71	1338,43	267,69
04-avr	111985,06	10192,65	2816,39	1341,14	268,23
05-avr	115446,21	10507,68	2903,44	1382,59	276,52

- A l'aide du tableau précédent on calcule le nombre de mole de CO<sub>2</sub> selon chaque équation de combustion pour les molécules de GNL :

**Tableau. III.6 : Les nombres de moles émit du CO<sub>2</sub> par chaque constituant.**

Jour	Nombre de mol CO <sub>2</sub>				CO <sub>2</sub> réactif
	CO <sub>2</sub> /CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	CO <sub>2</sub> /C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	CO <sub>2</sub> /C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	
01-avr	112455,86	20471,01	8484,69	5387,11	269,36
02-avr	112010,40	20389,92	8451,08	5365,77	268,29
03-avr	111759,16	20344,18	8432,13	5353,73	267,69
04-avr	111985,06	20385,30	8449,17	5364,55	268,23
05-avr	115446,21	21015,36	8710,31	5530,36	276,52

- **Remarque** : Le CH<sub>4</sub> est le composant dont la combustion est à l'origine de la plus grande proportion d'émissions de CO<sub>2</sub>, C'est parce qu'il est le plus abondant dans la composition

- Le nombre total de mole et la quantité total de CO<sub>2</sub> émit de la combustion de GNL est définie dans le tableau suivant :

**Tableau. III.7 : La quantité total de CO<sub>2</sub> émit de la combustion de GNL**

Jour	Nombre mol TOTAL CO <sub>2</sub>	Quantité CO <sub>2</sub> (g)	Quantité CO <sub>2</sub> (kg)	Quantité CO <sub>2</sub> (Tonne)
01-avr	147068,03	6470993,1	6470,99	6,47
02-avr	146485,46	6445360,35	6445,36	6,45
03-avr	146156,89	6430903,05	6430,90	6,43
04-avr	146452,31	6443901,75	6443,90	6,44
05-avr	150978,75	6643065	6643,07	6,64

### III.3. La masse totale d'émission de CO<sub>2</sub> pour le four n°2 :

Après avoir calculé la masse d'oxyde dégagée par chaque étape du procédé de fabrication du clinker, On peut calculer la masse totale de l'oxyde en additionnant la masse totale de la combustion du gaz naturel avec la masse totale du procédé de décarbonation de CaCO<sub>3</sub> et MgCO<sub>3</sub>.

- **Remarque** : La masse de dioxyde de carbone émise par la décarbonation (96%) est bien supérieure à celle émise par la combustion du gaz naturel (4%).
- Le tableau ci-dessous définie la masse totale de CO<sub>2</sub> de four °02 avec le rapport entre la masse de CO<sub>2</sub> et la masse de clinker produit.

**Tableau. III.8 : La masse totale de CO<sub>2</sub> de four °02**

Jour	CO <sub>2</sub> Décarbonation (T)	CO <sub>2</sub> combustion (T)	TOTAL CO <sub>2</sub> (T)	T CO <sub>2</sub> /T kk (cte)
01-avr	164,92	6,47	171,39	0,61
02-avr	161,45	6,45	167,89	0,61
03-avr	159,40	6,43	165,83	0,61
04-avr	158,76	6,44	165,20	0,61
05-avr	162,04	6,64	168,69	0,61

# CONCLUSION GÉNÉRALE



## CONCLUSION GÉNÉRALE

---

La production mondiale de ciment a augmenté rapidement ces dernières années, et après la combustion des carburants et la production d'électricité, c'est la troisième plus grande source de dioxyde de carbone anthropique.

Malgré les avantages économiques et structurels de l'industrie du ciment, les effets de leurs émissions restent une préoccupation majeure dans les milieux environnementaux, ce qui présente des défis futurs pour la société BISKRIA CIMENT SPA dans le cadre des efforts continus des experts pour identifier les risques d'air pollution et trouver des solutions efficaces. C'est pourquoi nos travaux ont porté sur la mesure de la masse de l'élément polluant gazeux le plus important de l'ère actuelle et le plus important gaz polluant émis par l'industrie cimentière en volume. Et c'est du dioxyde de carbone.

Les résultats de nos calculs ont montré qu'environ la moitié de la masse de la farine utilisée comme matière première pour la production de clinker sort sous forme de dioxyde de carbone. Bien que l'utilisation du gaz naturel liquéfié, qui a réduit le volume des émissions par rapport à d'autres types de combustibles fossiles. Que cela reste un volume énorme si l'on considère le niveau du débit de réactifs et de produits par heure.

Nous avons besoin d'investissements majeurs dans les nouvelles technologies de décarbonatation et de changements dans le fonctionnement de l'industrie cimentière. Car l'augmentation du dioxyde de carbone atmosphérique est probablement la composante qui connaît la croissance la plus rapide au monde et qui nuit très fortement à l'écosystème mondial.

---

[1]: Abeer M. El-Sayed, Abeer A. Faheim, Aida A. Salman et Hosam M. Saleh « Industrie du ciment », 9 juin 2021, (22/06/2022).

[2]: [https://www.cbr.be/fr/system/files\\_force/assets/document/tf-ciment-portland-compose-gris-cem-ii-b-m](https://www.cbr.be/fr/system/files_force/assets/document/tf-ciment-portland-compose-gris-cem-ii-b-m), (22/06/2022).

[3]: Documentations de l'usine Biskria cimenterie SPA.

[4]: <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Argile.html>. (20/05/2022)

[5]: MEBARKI HENEN, Étude comparative des clinkers de l'ouest Algérien : Analyse Physicochimique et Applications. Mémoire de master en Chimie 2012/2013, Université abou Bekr Belkaid Tlemcen.

[6] : BENGUEDOUAR AFEFF, SYNTHÈSE ET CARACTÉRISATION DE SILICATES DE CALCIUM HYDRATES (C.S.H) HYBRIDES. Mémoire de MAGISTER en Chimie 2012/2013. Université Constantine 1.

[7] : <https://xrf-spectroscopy.com/>. (03/04/2022).

[8] : <https://earthobservatory.nasa.gov/features/CarbonCycle>. (03/04/2022).

[9] : <https://goodsforlife.ru/fr/increase-the-concentration-of-carbon-dioxide-in-the-atmosphere-the-level-of-carbon-dioxide-in-the-atmosphere-reached-a-record-figure-over-the-past-several-hundred-years.html>. (30/05/2022).

[10] : STÉPHANIE MONJON et SANDRA PONCET « LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE EN CHINE Mirage ou 'virage vert' ? » 20 Juillet 2018.

[11] : WWF Allemagne, Berlin, « Climate protection in the concrete and cement industry » Février 2019.

---

[12] : M Sonebi, Y Ammar, P Diederich. « Sustainability of Construction Materials (Second Edition) » 2016

[13] : <https://www.choisir.com/energie/articles/163187/gaz-naturel-liquefie-lavenir-de-lenergie-avec-les-gnl> (05/06/2022).

## Résumé

Ce travail a été réalisé dans la Société Nationale avec des procédures spéciales pour l'industrie du ciment (Biskria Cimenterie) dans la Wilayat de Biskra. Le but de ce travail est de réaliser une évaluation des émissions de dioxyde de carbone du four n°2.

Pour atteindre cet objectif, nous avons commencé à calculer le gaz émis avec une explication des raisons de sa formation.

## تلخيص

تم تنفيذ هذا العمل في الشركة الوطنية بإجراءات خاصة بصناعة الأسمنت (بسكرية للاسمنت) بولاية بسكرة. الغرض من هذا العمل هو إجراء تقييم لانبعاثات ثاني أكسيد الكربون للفرن رقم 2.

لتحقيق هذا الهدف ، بدأنا في حساب الغاز المنبعث مع شرح أسباب تكوينه.

## Abstract

This work was done in the National Company with special procedures for the cement industry (Biskria Cimenterie) in the Wilayat of Biskra. The purpose of this work is to carry out an evaluation of the carbon dioxide emissions of furnace n°2.

To achieve this goal, we began to calculate the gas emitted with an explanation of the reasons for its formation.