



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 :
ATHMANI CHOAAYB

Le : Lundi 02 juin 2025

Étude comparée des ciments avec différents ratios C/K : performance , coût et durabilité

Jury :

Mme	REHALI Hanane	MCA	Université de Biskra	Président
Mme	DIAFI Malika	pr	Université de Biskra	Examineur
Mme	DIGHECHE Kelthoum	MCA	Université de Biskra	Encadreur
Mme	AMRANI Belkacem	Chimiste	SPA BISKRIA CIMENT	Co-Encadreur

Année universitaire: 2024 - 2025

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ
الرَّحِيمِ

Remerciements

Louange à Allah, le Tout-Puissant, de m'avoir accordé la force, la santé et la patience pour accomplir ce travail. Que la paix et les bénédictions soient sur Son Prophète Mohammed ﷺ

Je tiens à exprimer ma plus profonde gratitude à Mme **Digheche Keltoum**, Maître de conférences et encadrante de ce mémoire, pour sa disponibilité, ses conseils précieux, sa bienveillance et sa rigueur scientifique. C'est un véritable honneur d'avoir été guidé(e) par une enseignante de sa qualité.

J'adresse également mes sincères remerciements à Mme **Rehali Hanane**, présidente du jury, ainsi qu'à Mme **Diafi Malika**, examinatrice, pour l'intérêt qu'elles ont porté à ce travail et pour leurs remarques constructives.

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'un stage au sein de la société SPA Biskria Ciment. Je remercie chaleureusement toute l'équipe de l'usine pour leur accueil et leur accompagnement, en particulier **M. Ahmed, M. Badri**, ainsi que l'ensemble du personnel du département performance et du laboratoire contrôle qualité, pour leur disponibilité, leur professionnalisme et leur générosité tout au long de mon séjour. Je n'oublie pas de remercier tous les enseignants du département de Chimie Industrielle de l'Université de Biskra, qui ont contribué à ma formation et à mon épanouissement académique.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

À mes chers parents, pour leur amour, leur patience et leurs sacrifices,

À ma famille, pour leur soutien et leurs encouragements constants,

À mes enseignants, pour leur transmission du savoir,

*Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement
de ce mémoire.*

Sommaire:

Remerciement:	i
Sommaire:	iii- v
Listes des figures:	vi- viii
Liste des tableaux:	vx
Introduction générale:	1
Chapitre I : Généralité sur le ciment	
I.1.Introduction:.....	3
I.2.Présentation du S.P.A BISKRIA CIMENT:.....	3
I.2.1.Définition du S.P.A BISKRIA CIMENT:.....	3
I.2.2.Fiche signalétique du S.P.A BISKRIA CIMENT:	4
I.2.3.Services de SPA BISKRIA Ciment:	4
I.2.3.1. Secteur administrative:	4
I.2.3.2. Secteur technique:	4
I.2.3.3. Secteur commercial:	4
I.3. Produits du S.P.A BISKRIA CIMENT:	4
I.3.1. Produits de ciment gris.....	5
I.3.2 . Produits de ciment blanc:	6
I.4.Etude bibliographique sur l'industrie ciment	8
I.4.1.Histoire de ciment:.....	8
I.4.2.Ciment:	9
I.4.2.1.Définition du ciment:.....	9
I.4.3.Ciment gris:	9
I.4.3.1.Définition de ciment gris:	9
I.4.3.2.Fabrication de ciment gris:	10
I.4.4.Constituants de base du ciment:	10
1)Matières premières :.....	10
2) Matières corrections :	11
I.4.5.Produit semi-fini (Clinker):.....	12
I.4.5.1. Compositions chimiques du clinker:	12

I.4.6. Procédure de fabrication du ciment :	13
1) Zone d'Extraction:	14
2) Zone cru:	16
3) Zone de caisson:	18
4) Zone de ciment:	22
05) Zone d'expédition	23
 Chapitre II : Partie expérimentale	
II.1.Introduction:	25
II.2.Préparation des échantillons	25
II.3. Analyses chimiques:	25
II.3.1.Détermination de la perte au feu:	25
II.3.2.Analyse (FRX):	27
II.3.2.1.Préparation des pastilles:	27
II.3.2.2. Analyse par spectrométrie de fluorescence X:	28
II.3.3. Analyse par diffraction des rayons X	28
II.5.1.Analyses mécaniques, physiques:	30
II.5.1.1. Analyses physiques:	30
A)Détermination de la surface spécifique par la méthode Blaine (SSB) :	30
B) Détermination du refus par la méthode de tamisage:	31
II.5.1.2.Analyses mécaniques:	32
Détermination de la résistance mécanique par compression et par flexion :	32
B) Mode opératoire :	32
C) Conservation des éprouvettes dans l'eau :	36
D) Résistance à la flexion:	37
E) Résistance à la compression:	37
II.6. Durabilite:	39
II.6.1. Matériaux utilisés:	39
II.6.2.Préparation du béton:	39
a.1)Préparation des Matériaux:	40
a.2) Mélange:	41
a.3) Moulage du béton:	41

a.4) démoulage du beton:.....	41
II.6.3.Test de la résistance à la compression:	44
a)Digital Compression Testing Machine:	44
b)Composants de la machine:	44
c)Étapes du test de compression:	44
Chapitre III: Résultats et discussions:	
III.1.Introduction:.....	47
III.2.Analyses chimiques:	47
III.2.1. Perte au feu:	47
III.2.2.Analyse (FRX):	48
III.2.3. Analyse par diffraction des rayons X (DRX):	49
III.3.Analyses mécaniques, physiques:	51
III.3.1.Analyses physiques:	51
III.3.1.1.Refus:	51
III.3.1.2. Surface spécifique par la méthode Blaine (SSB) :.....	52
III.3.2.Analyses mécaniques:	53
III.3.2.1.Résistance mécanique:	53
III.4. Durabilite:.....	55
III.4.1.Résistance à la compression du béton:	55
III.5.Coût:.....	57
III.6.Comparaison des différents types de ciment (performance, durabilité et coût) :.....	58
Conclusion générale:	60
Références:.....	64

Listes des figures	Page
Chapitre I : Généralité sur le ciment	
Figure I.1: L'usine du SPA BISKRIA Ciment	3
Figure I.2 : Logo SPA Biskria Ciment	4
Figure I.3 : Fabrication de ciment gris	10
Figure I.4: Grain du calcaire	10
Figure I.5 : Argile	11
Figure I.6: Minerai de fer (Fe_2O_3).	11
Figure I.7: Sable SiO_2	12
Figure I.8 : Gypse	12
Figure I.9: Clinker	12
Figure I.10: Zone d'Extraction	14
Figure I.11: Extraction des matieres premiers	14
Figure I .12 : concasseur.	15
Figure I .13 : Polars de stockage	15
Figure I .14 : Zone cru	16
Figure I.1: Hall de pré-homogénéisation à l'intérieur	16
Figure I.16 : Doseur	17
Figure I.17 : Broyeur de cru (VRM)	17
Figure I.18 : Silo d'homogénéisation:	18
Figure I.19 : Zone de caisson.	18
Figure I.20: Tour préchauffage	19
Figure I.21 : Four rotatif	20
Figure I.22 : Refroidisseur	21
Figure I.23 : Silo clinker	21
Figure I.24: Zone de ciment.	22
Figure I.25 : Broyage de ciment (VCM)	22
Figure I.26: Silos de stockage du ciment	23
Figure I.2 : Expédition en sac	23
Figure I.28 : Expédition en vrac	23

Chapitre II :Partie expérimentale	
Figure II.1: Four pour la mesure de la perte au feu(PAF)	26
Figure II.2: Pastille	27
Figure II.3: Presse hydraulique	27
Figure II.4: Analyseur RX	28
Figure II.5 : Disque de broyage.	29
Figure II.6: Broyeur à disque.	29
Figure II.7: Appareil de Blaine	30
Figure II.8 : Tamiseuse Alpine	31
Figure II.9: Balance + 10g de ciment	31
Figure II.10: Malaxeur	33
Figure II.11: Moule de 4 x 4 x16	34
Figure II.12: Appareil choc	35
Figure II.13: Moule préparé	35
Figure II.14: Chambre humide	36
Figure II.15: Appareil de flexion et compression	38
FigureII.16: Matériaux utilisés	39
FigureII.17: Pesée des matériaux pour la préparation du béton	40
Figure II.18: Bétonnière	41
Figure II.19: Moule cubique (150x150x150 mm).	41
Figure II.20: Préparation des échantillons.	41
Figure II.20: Échantillons de béton identifiés, prêts pour l'essai de compression.	42
Figure II.22 : Mélange de béton avec adjuvant.	43
Figure II.23 : Digital Compression Testing Machine	44
Chapitre II :Résultats et discussions	
Figure III.1: Variation de PAF 950°C	47
Figure III.2: Variation de CaO	49
Figure III.3: Variation des compositions minéralogiques.	50
FigureIII.4: Variation de refus 45µ	51
Figure III.5: Variation de SSB.	53
Figure III.6: Variation de la résistance à la compression	54
Figure III.7 : Variation de la résistance à la flexion.	54

Figure III.8 : Variation de la résistance à la compression du béton sans adjuvant.	56
Figure III.9 : Variation de la résistance à la compression du béton avec adjuvant.	56

Liste des tableaux	Page
Chapitre I : Généralité sur le ciment	
Tableau I.1: produits du S.P.A BISKRIA CIMENT	6
Tableau I.2 : Compositions chimiques majeures et mineures	13
Tableau I.3: Composition minéralogique du clinker	13
Chapitre II :Partie expérimentale	
Tableau II.1: Différents rapports C/K pour trois types de ciment.	25
Tableau II.2 : Définition la masse et le temps de calcination de l'échantillon	26
Tableau II.3: Définition la masse et le temps de broyage et mixage de l'échantillon.	29
Tableau II.4: Valeurs de la résistance à la compression selon les normes internationales.	38
Tableau II.5 : Composition des mélanges pour les essais en laboratoire (béton sans adjuvant).	39
Tableau II.6 : Composition des mélanges pour les essais en laboratoire (béton avec adjuvant).	43
Chapitre III :Résultats et discussions	
Tableau III.1: Résultats d'analyse PAF 950°C	47
Tableau III.2: Résultats d'analyse FRX	48
Tableau III.3: Résultats d'analyse DRX	50
Tableau III.4: Résultats de refus 45μ.	51
Tableau III.5: Résultats de SSB.	52
Tableau III.6: Résultat de compression et flexion.	53
Tableau III.7: Résultat de la résistance à la compression du béton avec et sans adjuvant.	55
Tableau III.8: Comparatif des types de ciment selon le rapport C/K, la performance, la durabilité et le coût.	58

Liste d'abréviation:

Abréviation	Signification
SPA	Société Par Action
CETIM	Centre technique des industrie mécanique
CEM	Ciment
KK	Clinker
SiO₂	Dioxyde de silicium
Al₂O₃	L'alumine, ou oxyde d'aluminium
Fe₂O₃	L'oxyde de fer
CaO	Chaux
SO₃	Trioxyde de soufre
MgO	L'oxyde de magnésium
K₂O	L'oxyde de potassium
Na₂O	L'oxyde de sodium
CO₂	L'oxyde d'oxygène
C₃S	Silicate tri-calcique
C₂S	Silicate bi-calcique
C₃A	Aluminates tricalciques
C₄AF	Ferro-aluminates tétra-calcique
PAF	Perte au feu
FRX	Spectrométrie de Fluorescence X
DRX	Analyse par diffraction des rayons X
SSB	Surface spécifique Blaine
VRM	Vertical Roller Mill
VCM	Vertical Cement Mill



INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale:

L'industrie de la construction constitue l'un des fondements majeurs du progrès économique et social. Le ciment, étant un composant essentiel, occupe une position cruciale dans la production de matériaux cimentaires comme le béton et le mortier. Avec l'évolution des normes de construction et d'infrastructure, la production de ciment s'est diversifiée, notamment grâce à l'incorporation d'adjuvants minéraux comme le calcaire au clinker. Cela a permis d'optimiser tant les performances que les coûts de production. Dans le contexte de notre projet de fin d'études, mené au sein de l'entreprise S.P.A BISKRIA CIMENT, nous avons étudié l'effet du ratio clinker/ciment (C/K) sur les performances mécaniques des ciments fabriqués, notamment la résistance à la compression et à la flexion. Trois types de ciment couramment utilisés sur le marché national et présentant des rapports C/K différents ont été sélectionnés (CEM I 42.5R, CEM II A-L 42.5R et CEM II B-L 32.5R).

L'objectif principal de cette étude est de comparer ces trois types de ciment en termes de performance mécanique, de durabilité et de coût.

Mon projet de fin d'études est structuré en trois chapitres, organisés comme suit :

- **Introduction générale**
- **Le premier chapitre** : Présentation de l'entreprise S.P.A BISKRIA CIMENT et étude bibliographique sur le ciment
- **Le deuxième chapitre** : Étude expérimentale et description des différentes méthodes d'essai appliquées aux échantillons de ciment
- **Le troisième chapitre** : Présentation des résultats des essais physiques et mécaniques, ainsi que des résultats des analyses chimiques.
- **Conclusion générale.**



CHAPITRE I



GÉNÉRALITÉ SUR LE CIMENT

I.1.Introduction:

L'Algérie représente un marché d'une importance cruciale dans le contexte méditerranéen. Depuis l'an 2000, le domaine de la construction en Algérie a connu une expansion significative, engendrant ainsi une demande accrue de matériaux et de solutions constructives. L'objectif de Biskria Ciment est d'accroître l'efficacité du développement socio-économique en Algérie tout en consolidant son avantage compétitif sur les plans national et international. Notre priorité première est de répondre à la demande nationale d'un produit local, tout en garantissant un accès constant aux matériaux de construction en matière de qualité, de variété et de services à des tarifs raisonnables. Et en second lieu, d'explorer des marchés à l'échelle mondiale [1].

I.2.Présentation du S.P.A BISKRIA CIMENT:**I.2.1.Définition du S.P.A BISKRIA CIMENT:**

L'entreprise de ciment « BISKRIA CIMENT » est une Société Par Actions (S.P.A) privée selon le droit algérien, fondée en janvier 2009. La mission primordiale de l'entreprise est de produire et de vendre des ciments. Elle se compose d'une unique entité qui est basée au quartier général de l'entreprise. Tous les actionnaires sont des acteurs économiques privés algériens. S'étendant sur 100 hectares, la cimenterie est située à 18 kilomètres au nord-est du centre administratif de Biskra, qui porte son nom, et à seulement 5 kilomètres au sud de la municipalité de Braniss. Elle obtient ses principales matières premières à partir du site de djebel M'hor pour le calcaire, qui est situé à environ 2 km, et d'Etaref pour l'argile, qui se trouve à 15 km [2].



Figure I.1: L'usine du SPA BISKRIA Ciment.

I.2.2.Fiche signalétique du S.P.A BISKRIA CIMENT:

- Adresse : DJAR BELAHRACHE, BRANIS, Wilaya de BISKRA 07000, ALGERIE.
- Capitale sociale : 4.284.000.000 DA.
- Forme juridique : Société par actions.
- Tel : +213 5 60 80 42 34
- Fax : +213(0) 33 55 81 22
- E-mail : contact@biskriaciment-dz.com
- Site web : <https://biskriaciment.com/>

**I.2.3.Services de SPA BISKRIA Ciment:**

La cimenterie dispose de trois lignes de production (deux lignes pour le ciment gris et une ligne en projet pour le ciment blanc), avec une capacité globale de 4 millions de tonnes par an. La S.P.A BISKRIA ciment opère dans trois domaines principaux [3].

I.2.3.1. Secteur administrative:

Inclut des services administratifs pour la gestion de l'entreprise.

I.2.3.2. Secteur technique:

Contient les trois lignes de production d'une capacité de 4 millions T/an

I.2.3.3. Secteur commercial:

Comprend le service de vente et d'expédition.

I.3.Les produits du S.P.A BISKRIA CIMENT:

La S.P.A Biskra Ciment fabrique des ciments de haute qualité qui sont constamment vérifiés par le laboratoire de la cimenterie et régulièrement contrôlés par le Centre d'Études et de services technologiques de l'industrie des matériaux de construction CETIM, conformément à la norme ISO 17025. Ces produits sont [1] :

Tous les produits sont conformes à la norme algérienne (NA442A6-2013) [2]:

À la cimenterie S.P.A BISKRIA CIMENT, quatre types de ciment gris et deux types de ciment blanc de haute qualité sont produits. Leurs caractéristiques peuvent s'expliquer comme suit:

I.3.1. Les produits de ciment gris:**1) CEM I 42.5R:**

Ciment Portland, conçu pour les bétons haute performance avec une résistance rapide à court terme, destiné aux applications où les délais de décoffrage sont restreints [3].

Compositions :

Clinker à hauteur d'au moins 90 % (KK)

Gypse à 05% (Sulfate de calcium sous forme de gypse, utilisé comme régulateur de prise.)

Complément à 100% formé d'un calcaire (L) de 1% à 6% .

2) CEM II A-L 42,5 R:

Ciment gris pour béton à performances élevées, il procure une utilisation confortable du au temps de prise idéale, destiné à la construction dans le bâtiment, le génie civil, ainsi dans la préfabrication.[3]

Compositions:

80% à 94% de clinker (KK).

Gypse à 05%

Complément à 100% composé d'un calcaire (L) 06% à 20%.

3) CEM II/B-L 32.5 R:

Ciment de Portland avec du calcaire Ciment gris prévu pour les travaux de construction, de génie civil industriel et routier[4].

Compositions :

60% à 74% de clinker (KK)

Gypse à 05%.

Complément à 100% composé d'un calcaire (L) 21% à 35% .

4) CEM I 42,5 N-SR3 LH :

Ciment portland résistant au sulfate Un Ciment gris résistant aux sulfates, pour la réalisation de béton mortiers, béton-armé ou non-armé en hivers comme en été, lorsqu'une résistance aux Sols agressives est préconisée[3].

Compositions :

Au moins 95% de clinker (KK)

Gypse à 05% [4].

I.3.2 .Les produits de ciment blanc:

1) CEM II/B-L 42.5N:

Ces produits de ciment blanc sont couramment utilisés dans les secteurs de la finition et de la décoration, ainsi que pour produire des composants contribuant à la sécurité routière, tels que les dalles monocouches et bicouches [3].

Compositions :

Clinker (KK) 80 à 94%

Gypse à 5%

Complément à 100% composé d'un calcaire (L), 6% à 20% .

2) CEM I 52.5 R:

Ciment blanc spécialement conçu et destiné pour les ouvrages d'art esthétiques et éléments décoratifs [3].

Compositions :

Clinker (KK) à 95%

Gypse à 5% .

Tableau I.1: produits du S.P.A BISKRIA CIMENT

CEM I 42.5R	
CEM II A-L 42,5 R	

CEM II B-L 32.5 R



CEM I 42,5 N-SR3 LH



CEM II B-L 42.5N



CEM I 52.5 R



I.4. Etude bibliographique sur l'industrie ciment

I.4.1. Histoire de ciment:

Le terme ciment a ses origines dans le latin « caementum », qui désigne un mortier ou un liant utilisé en maçonnerie. Ce sens initial a été préservé en se limitant aux liants hydrauliques, c'est-à-dire ceux qui peuvent durcir lorsqu'ils sont en contact avec l'eau. Ce sont les Grecs qui, les premiers, ont utilisé la chaux produite par la cuisson du calcaire. Les Romains perfectionnent ce mélange en incorporant des cendres volcaniques et des briques broyées, parvenant ainsi à un liant hydraulique, qui se situe entre la chaux et le ciment véritable. Ce matériau permet l'édification de grandes structures comme les arènes, les thermes, les amphithéâtres ou les aqueducs, dont certains sont encore en excellent état deux millénaires plus tard. Les premières chaux hydrauliques, qui sont similaires aux ciments contemporains, ont vu le jour au XVIII^e siècle, principalement grâce aux avancées dans les processus de cuisson. En 1759, John Smeaton, un Anglais, fabrique un mortier d'une dureté comparable à celle de la pierre en combinant des cendres volcaniques et des chaux hydrauliques. En 1817, le Français Louis Vicat découvre les principes chimiques derrière le ciment et établit les normes de production du ciment hydraulique. Il est reconnu comme l'auteur de l'invention du ciment moderne, cependant, il a choisi de publier ses recherches sans déposer de brevets. Joseph Aspdin, un Anglais, a déposé un brevet en 1824 pour le ciment « Portland », fabriqué grâce à une méthode de calcination qui combine la cuisson du calcaire et de l'argile dans des fours alimentés au charbon. Le terme « Portland », basé simplement sur la ressemblance de couleur et de dureté avec la pierre de Portland (située dans le sud de l'Angleterre), est encore utilisé dans le secteur industriel aujourd'hui. En 1872, en Belgique, la première cimenterie a été établie (Messieurs Dufosse et Henry ont créé la première usine de production de ciment Portland du pays à Cronfestu). À partir de la fin du XIX^e siècle, le béton moderne, qui repose sur l'utilisation de ciment Portland, s'impose comme un matériau de construction couramment utilisé. Au fil du 20^{ème} siècle, la production de ciment a connu de nombreuses améliorations, y compris l'élaboration de ciments spécifiques, tout en préservant les propriétés physico-chimiques et les traits essentiels du ciment Portland [5].

I.4.2.Ciment:**I.4.2.1.Définition du ciment:**

Le ciment est un agent liant hydraulique, c'est-à-dire une substance inorganique finement broyée qui, lorsqu'elle est mélangée avec de l'eau, crée une pâte qui durcit et se fixe grâce à des réactions et processus d'hydratation. Une fois durci, il conserve sa solidité et sa stabilité même en présence d'eau.

Le ciment, lorsqu'il est correctement combiné avec des granulats et de l'eau, devrait pouvoir générer un mortier ou un béton qui conserve une ouvrabilité pendant un temps assez étendu. De plus, après des intervalles précis, il doit atteindre certains niveaux de résistance et également manifester une stabilité de volume sur le long terme. La principale raison pour laquelle la pâte de ciment se solidifie est l'hydratation des silicates de calcium. Toutefois, d'autres éléments chimiques peuvent également participer au processus de durcissement, comme les aluminates, par exemple. Dans les ciments, la masse combinée des proportions de l'oxyde de calcium (CaO) et du dioxyde de silicium (SiO₂) actifs doit représenter au moins 50 %.

Les ciments sont composés de petites particules individuelles de diverses substances, mais leur composition doit être statistiquement uniforme. Un niveau élevé de constance dans toutes les caractéristiques du ciment est assuré par un processus de production en continu à grande échelle et, plus spécifiquement, grâce à des méthodes appropriées de broyage et d'homogénéisation [6].

I.4.3.Ciment gris:**I.4.3.1.Définition de ciment gris:**

Le ciment gris est généralement employé pour édifier des bâtiments, des routes, réaliser des enduits ou concevoir des mortiers. Cependant, pour une meilleure fiabilité, notamment dans la construction en milieux humides ou marins, on trouve des ciments dédiés qui offrent une plus grande ténacité. Il est envisageable également d'utiliser du ciment gris pour produire des bétons à prise ultra-rapide ou qui peuvent supporter une élévation importante de la température [7].

I.4.3.2.Fabrication de ciment gris:

Le schéma suivant illustre les principales étapes de la fabrication du ciment gris, en montrant les matières premières, les ajouts et leur combinaison finale.

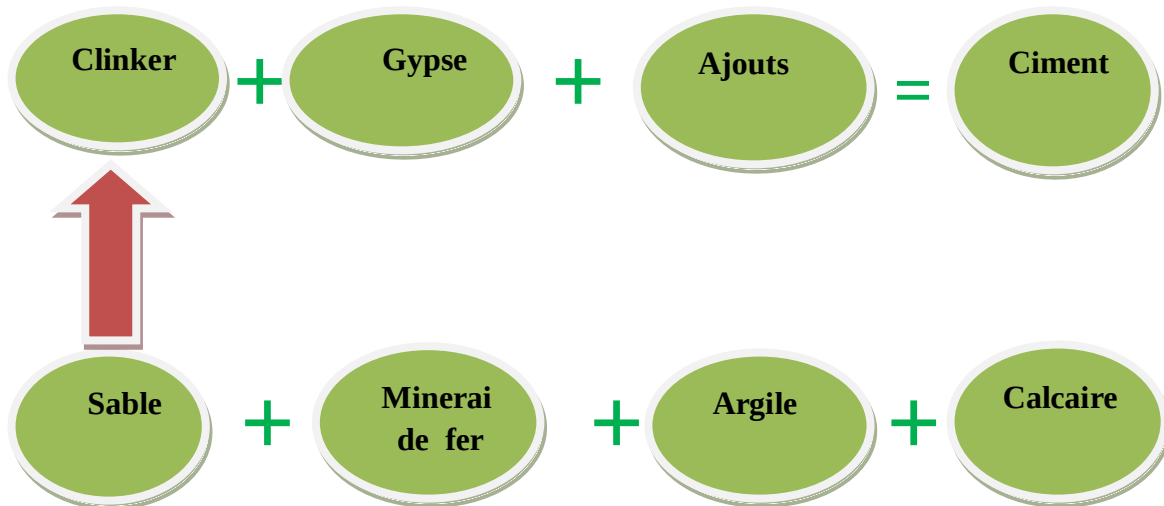


Figure I.3 : Fabrication de ciment gris.

I.4.4.Constituants de base du ciment:

1)Matières premières :

Le calcaire et l'argile sont les ressources indispensables à la production du ciment. Ces substances sont obtenues par détonation, puis déplacées à l'aide de bulldozers et de camions de grande taille vers le site de concassage où elles sont réduites de grandes roches à des pierres de plus petit diamètre [1].

1.a) Calcaire :

On a tendance à extraire le calcaire de la carrière. Il pourrait constituer jusqu'à 80% de la masse globale du mélange non raffiné. Le calcaire est une roche sédimentaire formée par des êtres vivants ; à titre d'exemple, les coquillages. Le calcaire est principalement constitué de calcite, qui peut renfermer plus de 99,9 % de CaCO_3 . Les calcaires renferment fréquemment des fossiles (restes de coquilles, squelettes d'organismes coloniaux, etc.) qui sont unis par une matrice calcaire [8].

1.b) Argile :

L'argile englobe toutes les minuscules particules issues des processus d'érosion ou d'altération des roches, y compris le sable (SiO_2), les oxydes (tels que l'oxyde ferrique

Fe_2O_3 qui confère une teinte rouge à certains sols), les carbonates comme la calcite, ainsi que toute autre forme minérale. Les argiles constituent de bons catalyseurs [9].



Figure I.5 : Argile [9]



Figure I.4: Grain du calcaire.

2) Matières corrections :

On incorpore des correcteurs tels que le minerai de fer fournissant du Fe_2O_3 , la bauxite pour l' Al_2O_3 , le calcaire pour le CaO et le sable pour le SiO_2 afin d'obtenir la composition désirée du cru. De plus, le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), qui agit comme un retardateur de prise, est broyé en compagnie du clinker.

a) Minerai de fer (Fe_2O_3) :

Le minerai de fer est une roche contenant du fer, généralement sous la forme d'oxydes.



Figure I.6: Minerai de fer (Fe_2O_3).

b) Sable :

Le sable est constitué de minuscules particules minérales (n'excédant pas deux millimètres). Il s'agit de roche fragmentée par l'érosion.

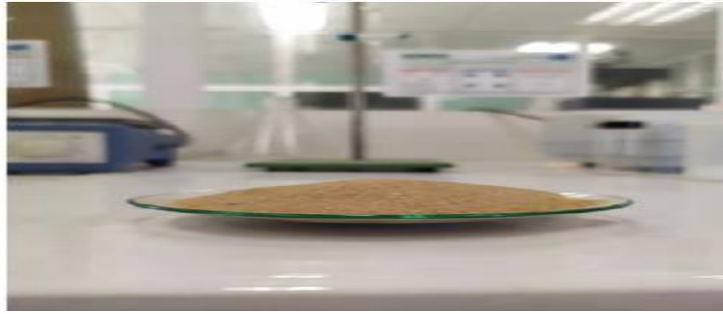


Figure I.7: Sable SiO_2 [1].

C) Gypse ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$):

Le gypse est un minéral qui se compose de sulfate de calcium dihydraté, ayant pour formule $CaSO_4 \cdot 2H_2O$. Ainsi, le terme gypse fait référence à la fois à une espèce chimique et à une roche. La Mine de Naica offre la possibilité d'observer des cristaux géants de ce minéral qui excèdent 11 mètres de longueur. Le plâtre est fabriqué à partir du gypse, qui est le minerai utilisé pour cela [10].



Figure I.8 : Gypse[4]

I.4.5.Produit semi-fini (Clinker):

Le clinker est une combinaison de calcaire $CaCO_3$ (environ 80 %) et d'argile (environ 20 %) qui a été cuit à une température de 1450 °C dans un four métallique allongé isolé par des briques réfractaires [11]. La composition du clinker est régulée par le contrôle interne des matières premières (calcaire, argile, bauxite, pyrite), dont on ajuste les proportions pour obtenir un mélange final à la composition appropriée [1].



Figure I.9: Le clinker [1]

I.4.5.1. Compositions chimiques du clinker:

Le clinker portland comprend les oxydes suivants : CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO TiO_2 , K_2O , Na_2O et CO_2 [3].

Tableau I.2 : Compositions chimiques majeures et mineures [3].

Compositions chimiques majeures	Compositions chimiques mineurs
Chaux (CaO)	Magnésie MgO
Silice (SiO_2)	Soufre SO_3
Alumine (Al_2O_3)	Alcalis Na_2O et K_2O
Ferrite (Fe_2O_3)	/

Les principaux constituants du Clinker portland se trouvent dans le tableau suivant:

Tableau I.3: Composition minéralogique du clinker [12].

Formule complete	Notation simplifiée	Appellation courant
$3CaO.SiO_2$	C_3S	Silicate tricalcique (Alite)
$2CaO.SiO_2$	C_2S	Silicate bicalcique (Bélite)
$3CaO.AL_2O_3$	C_3A	Aluminate tricalcique
$4CaO.AL_2O_3.Fe_2O_3$	C_4AF	Aluminate-fer-tetracalcique

I.4.6. Procédure de fabrication du ciment :

Le cru est réalisé à partir d'un mélange calcaire – argile sous-titré et corrigé par du sable et du minerai de fer .

La production de ciment se divise en cinq zones majeures:

1. Zone d'Extraction.
2. Zone cru.
3. Zone de caisson.
4. Zone de ciment.
5. Zone de ciment.

1) Zone d'Extraction:

La figure ci-dessous montre la zone d'extraction des matières premières nécessaires à la fabrication du ciment, notamment le calcaire et l'argile.

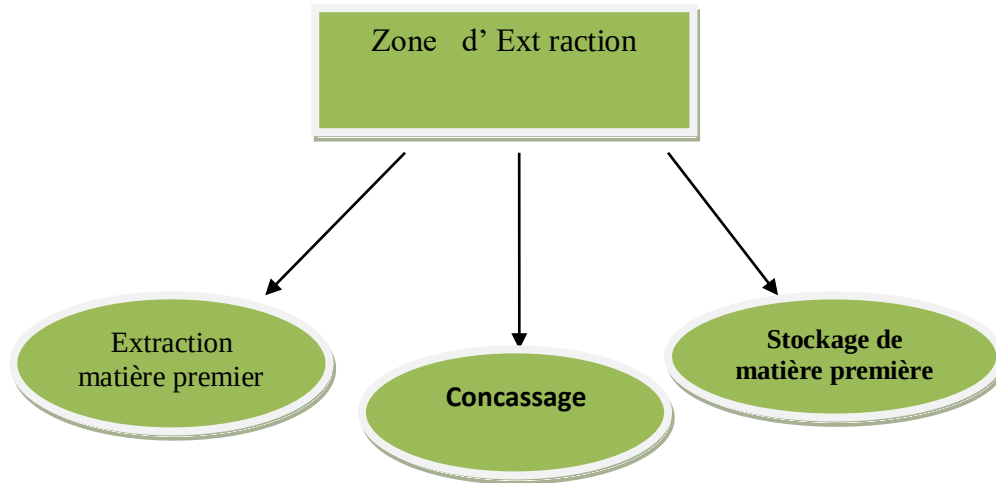


Figure I.10: Zone d'Extraction.

a)Extraction des matières premières:

On extrait le calcaire et l'argile de carrières qui se trouvent à proximité des usines de ciment. Les rochers et blocs, une fois détonés, sont acheminés vers des concasseurs par le biais de grands camions appelés tombereaux. On applique une sélection stricte à ces matières premières. Ils doivent contenir de la chaux, de la silice, de l'alumine et de l'oxyde de fer en quantités précisément définies [13].



Figure I.11: Extraction des matieres premiers [1].

b) Concassage:

Le rôle du concasseur est de réduire les matières premières à des dimensions appropriées pour le broyeur. Les matériaux bruts sont extraits des carrières sous forme de gros blocs contenant leur humidité naturelle, et ils doivent être séchés et ensuite broyés à la taille granulaire souhaitée [7].



Figure I .12 : Concasseur [9].

c) Stockage de matière première:

Après l'opération de concassage de ces constituants de base, les constituant sont acheminés vers des zones de stockage par des tapis roulant couvert, pour pré-homogénéisation .

Dans l'usine de BISKRIA CIMENT les matières premières sont stockées comme suit: le calcaire (deux polars blanc et rouge de capacité 40 000 t chacun) et l'argile (polar vert de capacité 40 000 t) [12].



Figure I .13 : Les polars de stockage [12].

2) Zone cru:

Cette figure montre les différentes étapes de la préparation du cru, de la pré-homogénéisation jusqu'au broyage

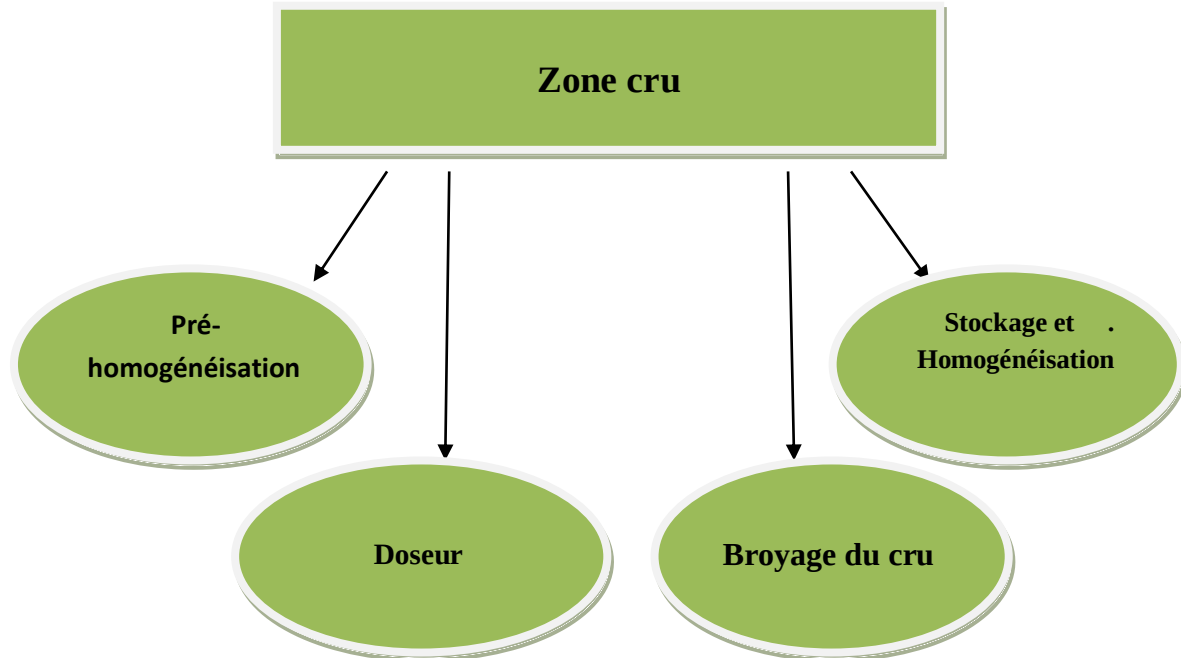


Figure I .14 : Zone cru.

a)Pré-homogénéisation:

La matière première est étendue en couches horizontales successives, qui finissent par former un tas, dont la composition globale est celle désirée. Les couches sont ensuite reprises verticalement, ce qui permet de prélever en permanence une matière de composition identique.

La matière est reprise dans les tas de pré-homogénéisation par des roues pelles, la pré-homogénéisation de la matière première se fait à l'aide d'un bras râteau, tournant autour d'un axe dans un hall [12].



Figure I.3: Le hall de pré-homogénéisation à l'intérieur [1].

b) Doseur:

Le dosage des différentes composantes est systématisé de manière automatique à l'entrée du broyeur, Afin de préparer de cru selon les propriétés souhaitées [14].



Figure I.16 : Doseur.

c) Broyage du cru :

L'objectif du broyage est Conversion de grosses particules en poudre. Après avoir déterminé par une consigne la teneur des différents composants.

Les matières premières doivent être séchées et broyées très finement dans des broyeurs à boulets ou dans des broyeurs à meules verticaux. Ces derniers plus récents, sont plus économes en énergie et permettent un séchage plus efficace, Le produit obtenu est appelé « la farine CRU » [3] [9].



Figure I.17 : Le broyeur de cru (VRM) [1].

d) Stockage et Homogénéisation:

La poudre obtenue à la sortie du broyeur est appelée farine. Cette farine est envoyée dans un silo de stockage appelés silo d'homogénéisation, d'une capacité unitaire de 20 000 t. Pour accroître l'efficacité de l'homogénéisation, le silo est alimenté et soutirés simultanément. La farine crue est homogénéisée par soufflage d'air sur-pressé. Cette opération permet d'améliorer la régularité des caractéristiques de la farine crue afin d'obtenir ensuite un clinker de qualité régulière [12].



Figure I.18 : Silo d'homogénéisation:

3)Zone de cuisson:

La zone de cuisson est une étape essentielle dans la production du clinker. Le schéma suivant résume les sous-étapes principales de cette zone.

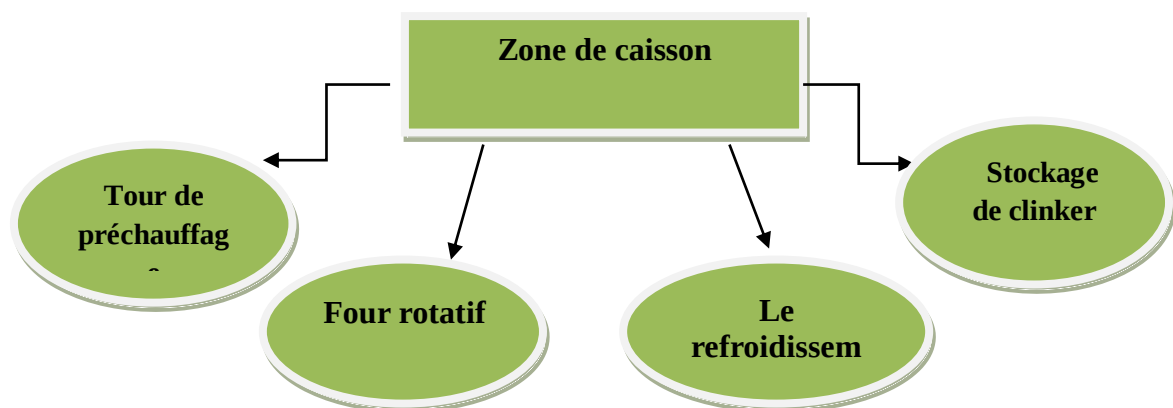


Figure I.19 : Zone de cuisson.

a) Tour de préchauffage :

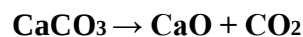
Le préchauffage est principalement utilisé pour traiter chimiquement et thermiquement la farine. Cette préparation nécessite le séchage des matières premières. Dans la tour de préchauffage (composée de cinq cyclones), la farine non cuite monte et redescend, car elle est reliée aux gaz chauds du four rotatif dans le sens opposé. Cette technique consiste à chauffer à l'avance la farine non cuite à une température proche de 900 degrés Celsius avant son entrée dans le four [1].

a.1) La déshydratation:

Un chauffage de la farine crue à 100 °C élimine l'eau libre non combinée. L'eau adsorbée par les argiles est libérée et s'échappe entre 100 et 300 °C [15].

a.2) La décarbonatation:

Les carbonates de calcium, qui constituent près de 80 % du cru, sont décomposés lors du chauffage en oxyde de calcium (CaO) et CO₂ selon la réaction suivante:



La décomposition du carbonate de magnésium en MgO et CO₂ est une réaction beaucoup moins intéressante pour la cuisson du clinker. [10]

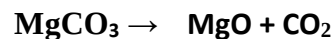


Figure I.20: Tour préchauffage [16] .

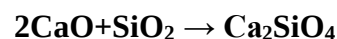
b) Four rotatif:

Le four rotatif permet d'effectuer la réaction de clinkérisation au cœur de la fabrication du ciment. Il s'agit d'un tube cylindrique de 50 à 90 mètres de long pour un diamètre allant de 3 à 6 mètres. La matière progresse grâce à l'inclinaison et à la rotation du four (1 à 3 tours/minute). En sortie des cyclones, la matière arrive en amont du four. Cette zone permet de porter les matières premières jusqu'à environ 800-900°C, achevant ainsi la décarbonatation du calcaire. La matière progresse alors jusqu'à la zone de clinkérisation correspondant à une température d'environ 1450°C. A cette température les réactions entre la chaux CaO et les oxydes SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ forment des silicates, aluminates et alumino-ferrites de calcium constituant le clinker [17].

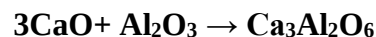


Figure I.21 : Four rotatif

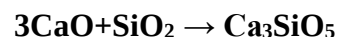
1. Formation du Silicate bi-calcique ou bélite (C₂S):



2. Formation du Aluminates tri-calciques ou célite (C₃A):



3. Formation du Silicate tri-calcique également ou Alite (C₃S) avec disparation totale de la chaux libre:



4. Formation du Ferro-aluminates tétra-calcique (C₄AF):



c) Refroidisseur:

Le rôle du refroidisseur est de réduire la température du clinker qui tombe du four, d'environ 1450°C à une température entre 80 et 100°C. Il est doté d'une batterie de ventilateurs qui assurent une circulation d'air rafraîchissant [8].



Figure I.22 : Refroidisseur [12]

d) Stockage du clinker:

La manutention du clinker est réalisée par des transporteurs métalliques vers les deux stocks polaires principaux de capacité unitaire de 30000t un troisième stock de 3000 est réservé pour les incuits. L'extraction de clinker est assurée par des extracteurs vibrants [18].



Figure I.23 : Silo clinker.[1]

4) Zone de ciment:

Après la cuisson et le refroidissement, le clinker est broyé avec d'autres composants pour produire le ciment. Cette étape est illustrée dans le schéma ci-dessous.

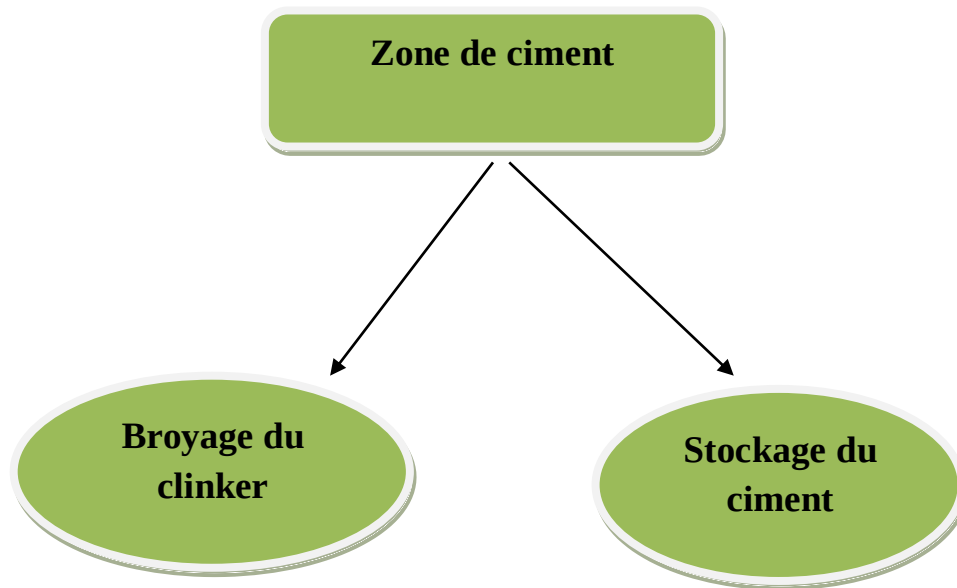


Figure I.24: Zone de ciment.

a) Broyage du clinker:

Le clinker mélangé à du gypse ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) en tant qu'accélérateur de prise, dans une proportion ne dépassant pas 5%, et éventuellement enrichi de produits secondaires (calcaire...), est broyé dans des installations de broyage de ciment afin d'obtenir le produit final, à savoir le ciment [8].



Figure I.25 : Broyage de ciment (VCM)

b) Stockage du ciment :

Suite au processus de broyage, on obtient du ciment sous sa forme finale qui est ensuite entreposée dans six silos d'une capacité de 20 000 tonnes chacun. Par la suite, il est commercialisé soit en sacs, soit en vrac [3].



Figure I.26: Les silos de stockage du ciment [4].

05) Zone d'expédition

01) Ensachage et expédition:

Le produit est commercialisé de deux manières : en sacs et en vrac.

Cette étape marque la fin du processus de production. Le ciment est soit ensaché automatiquement, soit chargé en vrac dans des camions-citernes pour la livraison directe aux clients.



Figure I.4 : Expédition en sac [1].

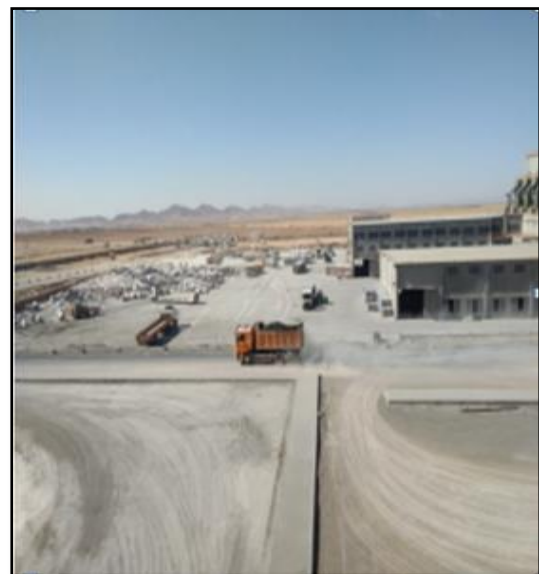


Figure I.28 : Expédition en vrac [1].



CHAPITRE II



PARTIE EXPÉRIMENTALE

II.Partie expérimentale:

II.1.Introduction:

Lors de mon stage à la cimenterie, j'ai fait plusieurs expériences scientifiques dans les laboratoires de chimie et de physique, ainsi que le laboratoire du béton, Dans ce chapitre, nous menons une étude comparative de trois types de ciment avec des rapports C / K ce qui concerne la performances et la durabilité. Le Tableau II.1 Presente les différents rapports C/K pour trois types de ciment.

Tableau II.1: Différents rapports C/K pour trois types de ciment.

Types de ciment	KK%	GYPSE%	AJOUTS %	C/K
CEM I 42.5R	93%	5%	2%	1.08
CEMII A-L 42.5R	80%	5%	15%	1.25
CEM II B-L 32.5R	65%	5%	30%	1.54

II.2.Préparation des échantillons

Nous apportons trois sacs de ciment (50 kg) :

- 1) CEM I 42.5R.
- 2) CEMII A-L 42.5R.
- 3) CEM II B-L 32.5R.

Ensuite, nous prélevons des échantillons de chaque sac au laboratoire d'analyse chimique

II.3. Analyses chimiques:

II.3.1.Détermination de la perte au feu:

Pour déterminer la perte au feu en suivant les étapes suivantes:

Peser et noter la masse d'une capsule en platine m1.

Peser et noter la masse de l'échantillon pe comme défini dans le tableau II.2.

Placer la capsule dans le four à $950^{\circ}\text{C} \pm 25^{\circ}\text{C}$ et laisser calciner comme indique dans le tableau II.2.

Sortir la capsule du four et laisser refroidir quelques minutes dans un dessiccateur.

Peser et noter la masse de capsule après perte au feu **m2**.

La figure II.1 Presente le four utilisé.

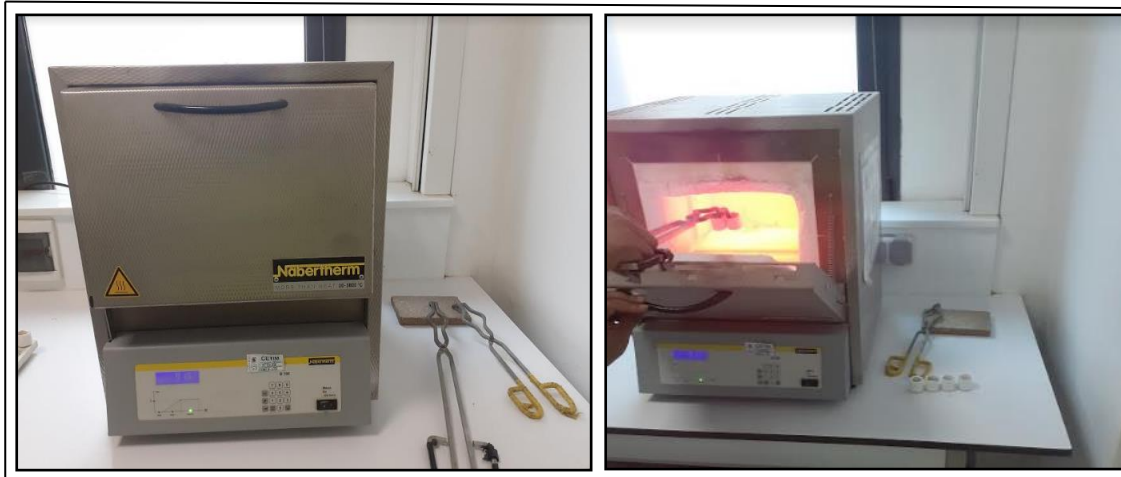


Figure II.1: Four pour la mesure de la perte au feu(PAF).

Tableau II.2 : Définition la masse et le temps de calcination de l'échantillon.

Matière	Prise d'essai	Temps de calcination
1) CEM I 42.5R	1g	Minimum 30min
2) CEMII A-L 42.5R		
3) CEM II B-L 32.5R		

II.2.1.1.Expression du resultat:

Pour mesurer la PAF on utilise la relation suivantes:

$$PAF = \frac{m1 + pe - m3}{pe} \times 100$$

PAF : perte au feu.

m1 : masse de la capsule vide en g.

pe : prise d'essai en g.

m2 : masse finale (capsule + matière calcinée).

II.3.2. Analyse élémentaire des ciments par spectrophotométrie de fluorescence (FRX):

II.3.2.1. Préparation des pastilles:

Mode opératoire :

Pour faire l'analyse par FRX, il faut d'abord préparer les échantillons comme suit :

- 1) Préparer trois échantillons correspondant aux trois types de ciment.
- 2) Peser 20 grammes de chaque type de ciment sur une balance.
- 3) Placer l'échantillon dans le disque de broyage.
- 4) Insérer le disque dans le broyeur à disque.
- 5) Réglage du temps de broyage à 90 secondes.
- 6) Peser 1 g de wax et l'ajouter à l'échantillon.
- 7) Après avoir ajouté la wax, nous broyons l'échantillon (ciment + wax) pendant 20 secondes dans le broyeur à disque.
- 8) Placez l'anneau en acier dans l'appareil (Presse Hydraulique).
- 9) Peser 10 g de l'échantillon et les mettre dans l'anneau en acier
- 10) Fermer la porte de la presse hydraulique et appuyer sur le bouton du programme choisi.
- 11) Attendre jusqu'à ce que l'opération de pression soit terminée.
- 12) Après la fin de l'opération de pression, nous obtenons une pastille prête pour l'analyse chimique par FRX.

Les figures II.2 et II.3 présentent les pastilles préparées et la presse hydraulique respectivement:



Figure II.2: Pastille.



Figure II.3: Presse hydraulique.

II.3.2.2. Analyse par spectrométrie de fluorescence X:

Mode opératoire :

Quand un échantillon est exposé à un rayonnement primaire provenant d'une source d'excitation énergétique, un ou plusieurs électrons peuvent être expulsés de leurs orbitales atomiques (ou couches électroniques). Par conséquent, un électron d'une couche électronique supérieure remplace l'électron qui a été éjecté et libère ainsi de l'énergie sous forme de rayons X. Ce phénomène de « Fluorescence » est caractérisé par le rayonnement secondaire. Chaque élément chimique possède un spectre de fluorescence X qui lui est propre. L'examen de ce spectre aide à reconnaître les éléments contenus dans un échantillon et à établir leurs concentrations [4]. La figure II.4 présente l'appareil utilisé.

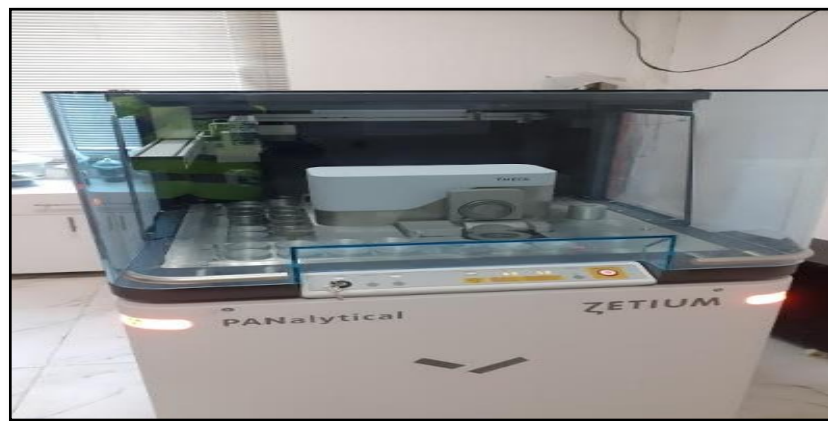


Figure II.4: Analyseur RX

II.3.3. Analyse par diffraction des rayons X

II.3.3.1. Objectif:

L'analyse par la diffraction des rayons X a pour but de savoir les phases obtenues et la composition minéralogique des échantillons.

b. Mode opératoire:

Pour préparer des échantillons pour cette analyse, il faut suivre les étapes suivantes:

- Peser 20 grammes de ciment à l'aide d'une balance.
- Placer les 20 grammes de ciment dans le disque de broyage.
- Ajouter 1 gramme de wax à l'échantillon.
- Broyer le mélange (ciment + wax) dans le broyeur à disque pendant 3 secondes.
- Peser 10 grammes de l'échantillon broyé et les placer dans l'anneau en acier

- Après l'application de la pression, on obtient une pastille prête pour l'analyse chimique par DRX. Le tableau II.3 présente la masse le temps de broyage et mixage de l'échantillon.

Tableau II.3 : Définition la masse et le temps de broyage et mixage de l'échantillon.

Type de matières	Type d'analyse	broyage		Mixage		
		Pds de l'échantillon(g)	Temps de broyage	Pds de l'échantillon(g)	Wax(g)	Temps de mixage
ciment	XRF	20	90	20	1	20
	DRX	/	/	20	1	3

Les figures II.5 et II.6 illustrent le broyeur à disque et le disque de broyage respectivement



Figure II.6 : Broyeur à disque.

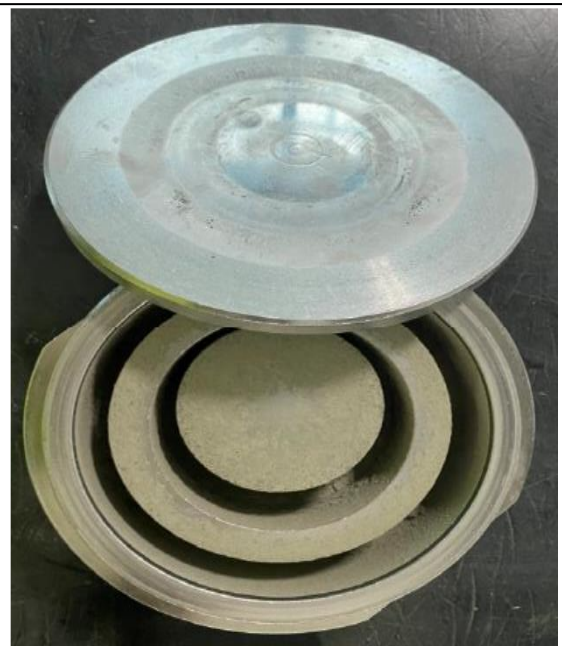


Figure II.5: Disque de broyage.

II.4. La performances :

II.4.1. Analyses mécaniques, physiques:

Le but de ses analyses est d'étudier le rapport C/K sur la performances du ciment.

II.4.1.1. Les analyses physiques:

A) Détermination de la surface spécifique par la méthode Blaine (SSB) :

🔧 Mode opératoire:

- On place une grille et un disque de papier filtre au fond de la cellule, puis on y verse le ciment.
- Un autre disque de papier filtre est placé sur le ciment, puis on le tasse soigneusement avec un piston.
- La cellule est installée dans l'appareil de Blaine avec une rotation légère pour assurer l'étanchéité.
- On aspire l'air lentement à travers le ciment et on mesure le temps que met le liquide à se déplacer entre deux repères.
- La valeur de la surface spécifique du ciment (en cm^2/g) est affichée directement sur l'écran de l'appareil ou calculée à partir du temps mesuré.

La figure II.4 présente l'appareil utilisé:



Figure II.7: Appareil de Blaine.

B) Détermination du refus par la méthode de tamisage:**a.Mode opératoire:**

Pour déterminer le refus, on suit les étapes suivantes :

- Peser $m_0=10$ grammes de ciment par une balance.
- Fixer le tamis sur la tamiseuse 45 μm .
- Placer le ciment dans le tamis.
- Démarrer la tamiseuse Alpine.
- Après le tamisage, peser la masse (m_1) restante dans le tamis.

Les figures II.8 et II.9 présentent la tamiseuse Alpine et la balance avec 10 g de ciment, respectivement:



Figure II.8 : Tamiseuse Alpine



Figure II.9: Balance + 10g de ciment

Pour déterminer le pourcentage de refus, on applique la relation suivante:

$$\text{Refus \%} = \frac{m_1}{m_0} \times 100 = \frac{\text{masse du residu}}{\text{masse de l'échantillon initial}} \times 100$$

m_0 : la masse de l'échantillon initial.

m_1 : la masse restante sur le tamis.

b.Exemple de calcul:

$m_0=10g$ de ciment (CEM I 42.5R)

Après tamisage, masse restante sur le tamis $m_1=0.27g$

Calcul du pourcentage de refus:

$$\text{Refus \%} = \frac{m_1}{m_0} \times 100$$

$$\text{Refus \%} = \frac{0.27}{10} \times 100 = 2.7\%$$

II.4.1.2.Analyses mécaniques:**A)Essai sur mortier:**

Les essais de flexion et de compression ont pour objectif de déterminer la résistance du mortier sous l'effet des efforts de traction par flexion et de compression. Cette méthode est utilisée pour vérifier si la résistance à la compression d'un ciment est conforme aux spécifications requises.

 Détermination de la résistance mécanique par compression et par flexion :**Laboratoire:**

- Il est impératif que le laboratoire où s'effectue la préparation des éprouvettes soit maintenu à une température de $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ et à une humidité relative d'au moins 50%.
- La chambre humide pour la conservation des éprouvettes, dans leur moule, doit être maintenue à une température de $(20,0 \pm 1,0) ^\circ\text{C}$ et une humidité relative supérieure ou égale à 90 %.[19]

B) Mode opératoire :**B.1.Préparation du mortier:****Composition du mortier:**

Les proportions en termes de masse doivent être les suivantes: une partie de ciment, trois parties de sable normalisé, et une demi-partie d'eau.

Chaque gâchée pour trois éprouvettes doit être constituée de (450 ± 2) g de ciment, $(1\ 350 \pm 5)$ g de sable normalisé et (225 ± 1) g d'eau.

1)Malaxage du mortier:

- Pèse 450 grammes de ciment.
- Pèse 1350 grammes de sable normalisé .
- Pèse 225 grammes d'eau.
- Régler l'appareil sur EN 196-1
- Mettre le ciment et l'eau dans le bol du malaxeur. Lors de cette opération, il faut veiller à ne pas perdre de matière. L'opération doit être achevée dans les 10 secondes.
- Lorsque l'eau entre en contact avec le ciment, le malaxeur doit être mis en marche immédiatement à petite vitesse pendant 30 secondes. Ensuite, après 30 secondes de malaxage, le sable doit être ajouté régulièrement pendant les 30 secondes suivantes.
- Augmentez la vitesse du malaxeur et poursuivez le malaxage pendant 30 secondes de plus.
- Eteindre le malaxeur pendant 90 secondes. Pendant les 30 premières secondes, à l'aide d'une raclette en plastique, ramener le mortier adhérent aux parois et au fond du bol vers le centre.
- Après les 90 secondes d'arrêt, reprendre le malaxage à grande vitesse pendant 60 secondes.
- À la fin du malaxage, on obtient un mortier homogène prêt à être coulé dans les moules.

La Figure II.10 presente le Malaxeur



Figure II.10: Malaxeur.

Remarque:

Pour les essais de validation, de l'eau distillée ou désionisée doit être utilisée afin de garantir la précision des résultats.

B.2.Préparation des éprouvettes :**Dimensions des éprouvettes:**

Les éprouvettes doivent avoir une forme prismatique et des dimensions de 4 cm x 4 cm x 16cm. La figure II.11 présente le moule de 4x4x16 cm



Figure II.11: Moule de 4 x 4 x16 cm

1)Moulage des éprouvettes:

Les éprouvettes seront moulées immédiatement après la préparation du mortier.pour faire le moulage ou suit les étapes suivantes:

- fixer solidement le moule sur la table à chocs.
- Mettez environ 300 g de mortier dans chaque compartiment du moule à l'aide d'une spatule appropriée, directement à partir du bol de malaxage.
- Étaler uniformément le mortier dans chaque compartiment à l'aide d'une grande spatule plate tenue presque verticalement.
- La première couche de mortier est compactée en appliquant 60 chocs à l'aide de l'appareil à chocs (Un choc par seconde, ce qui signifie que cette opération dure une minute).
- Une deuxième couche de mortier est placée dans le moule avec un léger trop-plein et nivelée avec une petite spatule plate.
- Compacter la deuxième couche de mortier à l'aide de l'appareil à chocs en appliquant 60 coups.
- Retirer délicatement le moule de la table à chocs, puis araser la surface avec une règle métallique tenue presque verticalement et déplacée en mouvement de scie transversal.
- Après l'opération de nivellement initial, la surface est lissée à l'aide d'une règle inclinée à 10 degrés.
- Nettoyer les bords du moule pour enlever les résidus de mortier. Apposer une marque d'identification sur chaque moule.

Les figures II.12 et II.13 illustrent l'appareil à chocs et le moule préparé respectivement.



Figure II.12: Appareil choc



Figure II.13: Moule préparé

Remarque :

L'utilisation de la table à chocs permet de chasser l'air emprisonné dans le mortier et d'assurer que celui-ci prenne correctement la forme du moule.

2)Manutention et conservation avant démoulage:

- ✚ Placez une plaque de verre qui ne réagit pas avec le ciment sur le moule(Il est nécessaire de s'assurer que les plaques de verre utilisées ont des bords lisses)
- ✚ Transférer les moules dans la chambre humide à l'aide d'un chariot.
- ✚ Placer le moule recouvert sur un support horizontal dans la chambre humide, maintenue à une température de $(20,0 \pm 1,0) ^\circ\text{C}$ et à une humidité relative $\geq 90\%$.
- ✚ Les moules ne doivent pas être empilés les uns sur les autres afin de permettre à l'air humide d'atteindre toutes les faces de chaque moule.

3)Démoulage des éprouvettes:

Après un séjour de 20 à 24 heures dans la chambre humide, les moules sont retirés le démoulage est effectué à l'aide d'un marteau en plastique, en veillant à ne pas endommager les éprouvettes.

Chaque éprouvette est étiquetée avec les informations suivantes:

- La date de réception du ciment au laboratoire
- Le type de ciment utilisé
- La date prévue pour l'essai de résistance à la compression et la flexion.

C) Conservation des éprouvettes dans l'eau :

Les éprouvettes d'essai, dûment identifiées, doivent être immergées sans délai dans des bacs contenant de l'eau à une température de $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$. La hauteur de la lame d'eau recouvrant la face supérieure des éprouvettes ne doit jamais être inférieure à 5 mm pendant toute la durée du stockage.

Les éprouvettes sont conservées dans le milieu aqueux jusqu'à la date de l'essai de résistance à la compression:

- Éprouvettes pour 2 jours $\pm 30\text{min}$
- Éprouvettes pour 7 jours $\pm 2\text{h}$
- Éprouvettes pour 28 jours $\pm 8\text{h}$

Après avoir retiré les éprouvettes de l'eau, on procède à la mesure de la résistance à la compression et à la flexion à l'aide de la machine d'essai de résistance à la compression et à la flexion.



Figure II.14:Chambre humide

D) La résistance à la flexion:

Après 2, 7 et 28 jours suivant la préparation du mortier, l'essai de flexion est effectué sur les éprouvettes (3 éprouvettes pour chaque âge : 2 jours, 7 jours et 28 jours)

- placer le prisme dans l'appareil de flexion, avec une face latérale de moulage posée sur les rouleaux d'appui.
- La charge est appliquée verticalement sur la face latérale opposée du prisme et elle est augmentée progressivement jusqu'à la rupture.
- Après l'essai de flexion, les deux demi-prismes issus de la rupture sont conservés afin d'être utilisés pour l'essai de résistance à la compression.

La résistance à la flexion moyenne (R_f) est calculée selon la formule:

$$R_f = \frac{R_{f1} + R_{f2} + R_{f3}}{3} = \frac{\sum R_{fi}}{3}$$

R_f : Résistance à la flexion moyenne (MPa).

R_{fi} : Résistance à la flexion pour chaque éprouvette (MPa)..

E) La résistance à la compression:

L'essai de résistance à la compression est effectué sur chaque demi-prisme

- Chaque demi-prisme est placé horizontalement et de manière centrée sur les plateaux de la machine d'essai.
- La charge est appliquée verticalement et augmentée progressivement jusqu'à la rupture.
- Les résultats de l'essai de résistance à la compression sont exprimés en (MPa).

La résistance à la compression moyenne (R_c) est calculée selon la formule:

$$R_c = \frac{R_{c1} + R_{c2} + R_{c3} + R_{c4} + R_{c5} + R_{c6}}{6} = \frac{\sum R_{ci}}{6}$$

R_c : La résistance à la compression moyenne.

R_{ci} : La résistance à la compression pour chaque demi-prisme.

La Figure II.15 présente l'appareil de flexion et compression.

Le Tableau II.4 illustre les valeurs de la résistance à la compression selon les normes internationales.

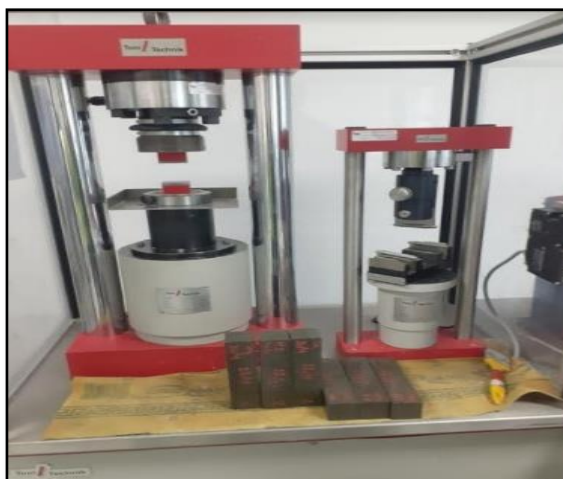


Figure II.15: Appareil de flexion et compression

Tableau II.4: Les valeurs de la résistance à la compression selon les normes internationales.

Classe de résistance	Résistance à la compression MPa			
	Résistance à court terme		Résistance courante	
	2 jours	7 jours	28 jours	
32,5 L a)	–	$\geq 12,0$	$\geq 32,5$	$\leq 52,5$
32,5 N	–	$\geq 16,0$		
32,5 R	$\geq 10,0$	–		
42,5 L a)	–	$\geq 16,0$	$\geq 42,5$	$\leq 62,5$
42,5 N	$\geq 10,0$	–		
42,5 R	$\geq 20,0$	–		
52,5 L a)	$\geq 10,0$	–	$\geq 52,5$	–
52,5 N	$\geq 20,0$	–		
52,5 R	$\geq 30,0$	–		
a) Classe de résistance uniquement définie pour CEM III				

II.5. La durabilité:

Travaux expérimentaux dans le laboratoire de béton:

Le but de l'expérience:

Le but de cette expérience est d'étudier l'effet du rapport c/k sur la durabilité du ciment

II.5.1. Matériaux utilisés:

Nous préparons les matériaux suivants :

- 1) CEM I 42.5R
- 2) CEMII A-L 42.5R
- 3) CEM II-B 32.5R
- 4) sable 0.4
- 5) sable fine
- 6) Gravier 8/15
- 7) Gravier 15/25
- 8) Eau



FigureII.16: Matériaux utilisés

II.5.2.Préparation du béton:

a) Sans adjuvant:

Tableau II.5 : Composition des mélanges pour les essais en laboratoire (béton sans adjuvant).

Essais laboratoire								
	Type de ciment	La masse de ciment	Sable		Gravier		Eau	Adjuvant
			sable 0.4	sable fine	Gravier 8/15	Gravier 15/25		
1	CEM I 42.5R	7Kg	7Kg	5Kg	13Kg	9Kg	4 L	sans
2	CEMII A-L 42.5R	7Kg	7Kg	5Kg	13Kg	9Kg	4L	sans
3	CEM II-B 32.5R	7kg	7Kg	5Kg	13Kg	9Kg	4L	sans

a.1) Préparation des Matériaux:

On pèse:

1. 7kg de ciment
2. 7kg de sable 0.4
3. 5Kg de sable fine
4. 13Kg de Gravier 8/15
5. 9Kg de Gravier 15/25



FigureII.17: Pesée des matériaux pour la préparation du béton.

a.2) Mélange:

1. Mettez du ciment, sable et du gravier dans la bétonnière.
2. Démarrez la bétonnière avec le bouton de démarrage.
3. La bétonnière mélange les composants.
4. Après avoir mélangé les composants (ciment, sable, gravier) pendant 3 ou 4 minutes, ajoutez progressivement 4L d'eau le processus de mélange se poursuit jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène.

**Figure II.18:** La bétonnière**a.3) Moulage du béton:**

1. Moulage du béton dans un moule cubique (150x150x150 mm).
2. Le compactage manuel du béton à l'aide d'une tige de fer: Le béton est piqué par la tige de fer verticalement dans chaque couche lors du remplissage du moule Le but de ce processus est d'évacuer l'air du béton, de répartir le béton dans le moule et de remplir les vides.

**Figure II.19:** Moule cubique (150x150x150 mm).**Figure II.20:** Préparation des échantillons. [20]**a.4) démoulage du beton:**

Le béton est retiré des moules après environ 24 heures, afin que le béton prenne la forme du moule, reste cohérent et que l'échantillon ne se désintègre pas lors du retrait du moule. Après le démoulage, nous ajoutons les informations sur chaque échantillon:

- Type de ciment.
- Dates de moulage.
- Date à laquelle nous testerons la résistance à la pression(2J / 7J/ 28J).



Figure II.21: Échantillons de béton identifiés prêts pour l'essai de compression.[21]

b) Avec adjuvant:

- **Nom de l'adjuvant :** Sika® ViscoCrete® Tempo 12
- **Présentation de Sika® ViscoCrete® Tempo 12:** ViscoCrete® Tempo 12 est un superplastifiant haut réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération non chloré à base de copolymère acrylique.
- **Caractéristiques générales:** Sika® ViscoCrete® Tempo 12 est un superplastifiant puissant qui confère aux bétons les propriétés suivantes :
 - longue rhéologie (>2h).
 - robustesse à la ségrégation.
 - qualité de paremen.[22]
- La même procédure de préparation du béton a été suivie que celle décrite précédemment (dosage, mélange, moulage, démoulage), à l'exception de l'ajout de l'adjuvant Sika® ViscoCrete® Tempo 12, introduit pendant le malaxage avec l'eau. Cet adjuvant a permis une réduction significative de la quantité d'eau utilisée (passant de 4 L à 2.7 L).



Le tableau II.6 présente la composition des mélanges pour les essais en laboratoire (béton avec adjuvant).

La figure II.22 présente le mélange de béton avec adjuvant .

Tableau II.6 : Composition des mélanges pour les essais en laboratoire (béton avec adjuvant).

Essais laboratoire								
	Type de ciment	La masse de ciment	sable		Gravier		Eau	Adjuvant (Temp o 12)
			sable 0.4	sable fine	Gravier 8/15	Gravier 15/25		
1	CEM I 42.5R	7Kg	7Kg	5Kg	13Kg	9Kg	2.7L	70ml
2	CEMII A-L 42.5R	7Kg	7Kg	5Kg	13Kg	9Kg	2.7L	70ml
3	CEM II-B 32.5R	7kg	7Kg	5Kg	13Kg	9Kg	2.7L	70ml

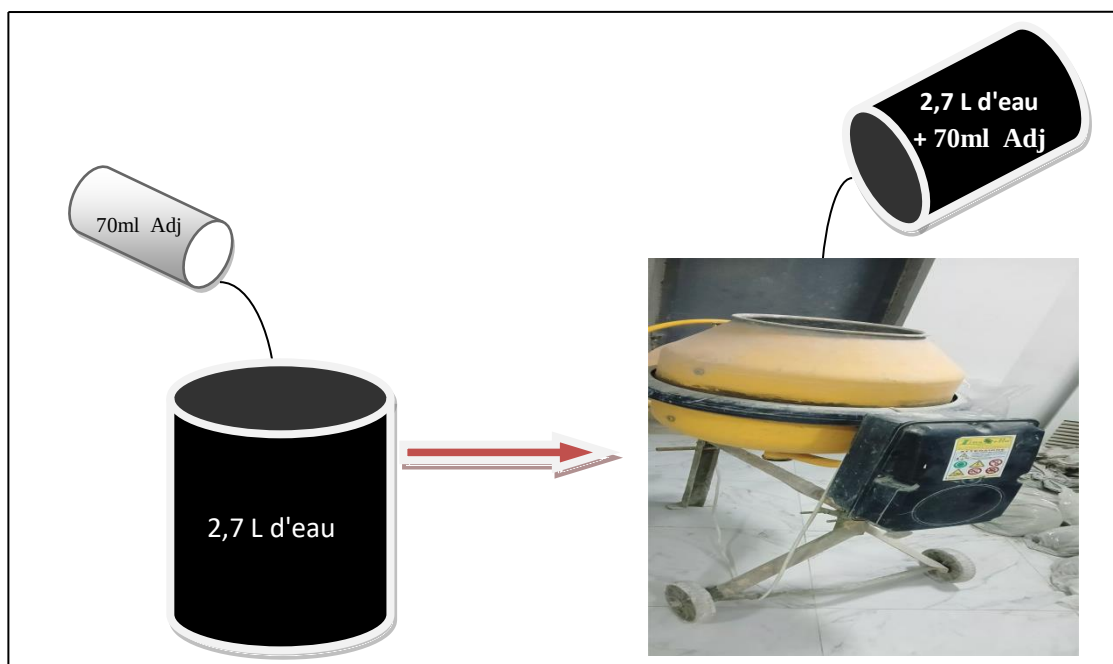


Figure II.22 : Mélange de béton avec adjuvant.

II.5.3. Le test de la résistance à la compression:

Le test de la résistance à la compression du béton a été réalisé à l'aide d'une machine de compression numérique (Digital Compression Testing Machine)

a) Digital Compression Testing Machine:

Cette machine est utilisée pour mesurer la résistance à la compression des échantillons de béton.

b) Composants de la machine:

- Structure externe en acier
- Deux cylindres de compression : un inférieur (fixe) et un supérieur (mobile)
- Affichage numérique pour afficher les résultats
- Deux boutons (Start/Stop)

Unité de mesure: kN (kilonewton)



Figure II.23 : Digital Compression Testing Machine.

c) Étapes du test de compression:

1. Poids de l'échantillon de béton : Nous pesons l'échantillon à l'aide d'une balance pour déterminer son poids avant le test.
2. Placez l'échantillon au centre du disque supérieur du cylindre inférieur: L'échantillon est placé au centre du disque supérieur du cylindre inférieur, afin d'assurer une répartition uniforme de la pression pendant l'essai
3. Appuyer sur le bouton "Start": Après avoir placé l'échantillon, l'appareil est mis en marche en appuyant sur le bouton "Start". Le cylindre supérieur descend progressivement sur l'échantillon de béton.
4. Affichage des resultants: Lors de l'application de la force sur l'échantillon, les résultats sont affichés sur l'affichage numérique de l'appareil.
5. Appuyer sur le bouton "Stop" : Lorsque l'échantillon se casse, on appuie sur le bouton "Stop" pour enregistrer les données concernant la force appliquée.

Remarque:

1. La résistance à la compression des échantillons est testée après 2 jours, 7 jours et 28 jours après le moulage des échantillons de trois types de ciment.

2. Ayant obtenu les résultats de l'expérience en kilonewtons, nous les convertissons en MPA.

$$R(\text{MPa}) = \frac{F(\text{KN}) \times 1000}{S(\text{mm}^2)}$$

R: Résistance (MPa).

F: Force (KN).

S: Surface (mm²).



CHAPITRE III



RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

III. Résultats et discussions:

III.1. Introduction:

Dans ce chapitre, nous allons présenter et analyser les résultats chimiques obtenus pour trois types de ciments (CEM I 42.5R, CEM II A-L 42.5R, CEM II B-L 32.5R), à l'aide d'appareils d'analyse avancés tels que le diffractomètre à rayons X (DRX) et le spectromètre de fluorescence X (FRX).

Nous procéderons également à la présentation et à l'analyse des résultats physiques et mécaniques, notamment la résistance à la compression et à la flexion, mesurées à l'aide de la machine d'essai appropriée.

L'objectif est d'évaluer les performances de ces différents types de ciments.

III.2. Analyses chimiques:

III.2.1. La perte au feu:

La perte au feu c'est le premier analyse que nous avons fait dans notre étude. nous avons analysé trois types de ciment qui sont (CEM I 42.5R,CEM II A-L 42.5R,CEM II B-L 32.5R) les résultats attendus sont illustrés dans le tableau III.1 et la figure III.1.

Tableau III.1: Résultats d'analyse PAF 950°C.

Types de ciment	C/K	PAF 950°C
CEM I 42.5R	1.08	2.72
CEMII A-L 42.5R	1.25	6.65
CEM II B-L 32.5R	1.54	8.21

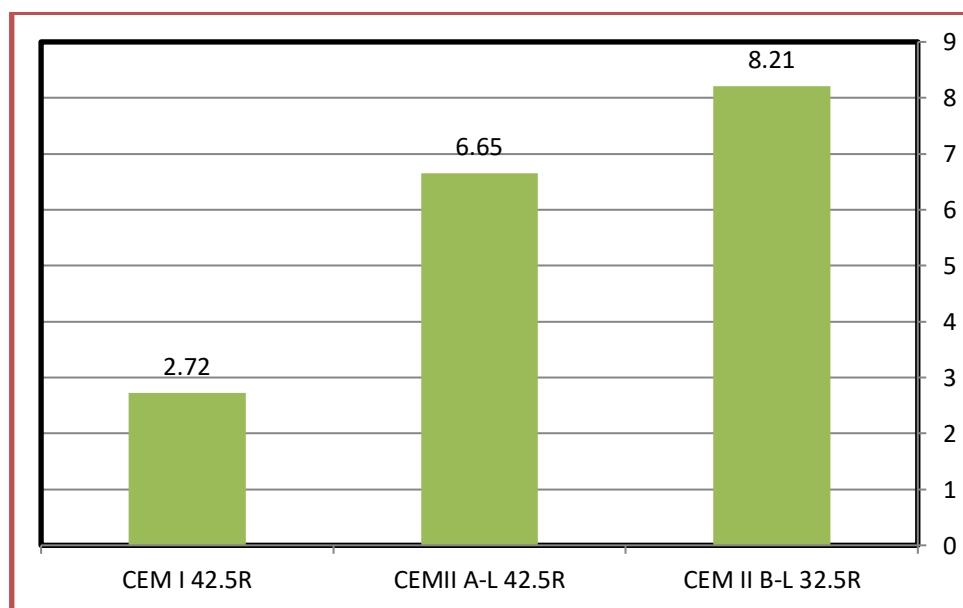


Figure III.1: Variation de PAF 950°C.

Discussion :

A partir des résultats obtenus, on remarque que l'augmentation de la teneur en calcaire dans la composition du ciment est accompagnée par une élévation de la perte au feu (PAF).

Cela est dû au fait que le calcaire (CaCO_3) se décompose thermiquement lorsqu'il est exposé à une température élevée d'environ 950°C , libérant du dioxyde de carbone (CO_2) ce qui entraîne une augmentation de la perte au feu (PAF).

Ainsi, une teneur plus élevée en calcaire conduit à une valeur plus élevée de la perte au feu (PAF).

III.2.2. Analyse élémentaire des ciments par spectrophotométrie de fluorescence (FRX):

L'analyse par spectrophotométrie de fluorescence est utilisée pour savoir la composition en minéraux dans nos échantillons. Les résultats de cette analyse sont présentés dans le tableau III.2.

La figure III.2 présente la variation de pourcentage de CaO dans les échantillons.

Tableau III.2: Résultats d'analyse FRX.

Types de ciment	Compositions								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Cl
CEM I 42.5R	19.51	4.63	3.49	62.55	3.4	2.46	0.64	0.14	0.033
CEMII A-L 42.5R	17.56	4.2	3.18	60.97	2.92	2.45	0.59	0.16	0.033
CEM II B-L 32.5R	16.03	3.58	3.18	59.47	2.54	2.59	0.53	0.18	0.037

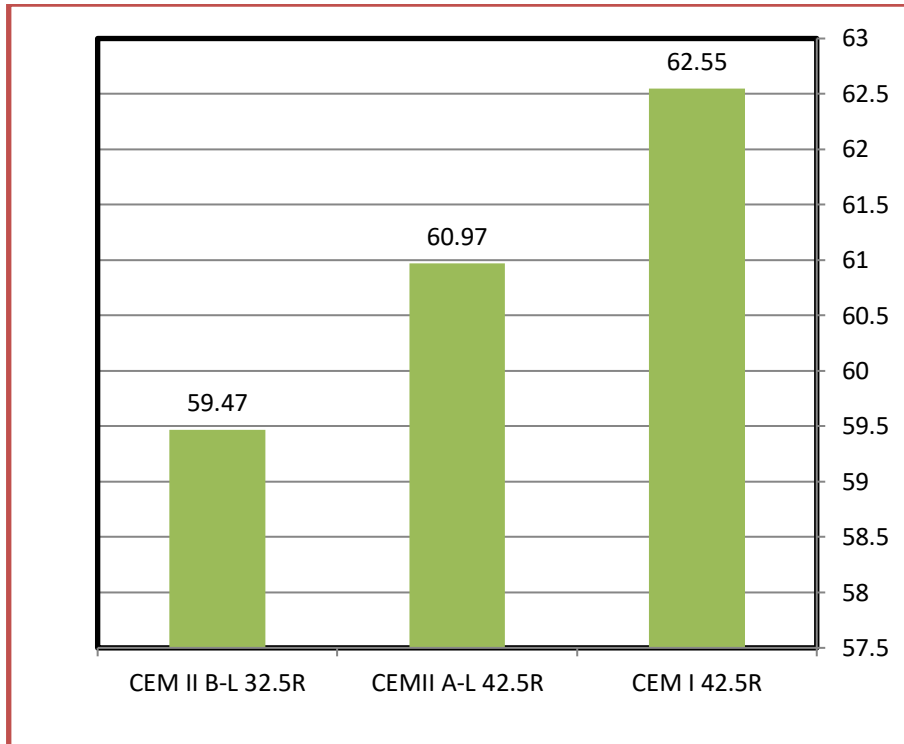


Figure III.2: Variation de CaO

Discussion :

À partir des résultats de l'analyse XRF, on observe une diminution du pourcentage de chaux (CaO) avec l'augmentation de la teneur en calcaire ajouté:

CEM I 42.5 R : 62,55 %, CEM II A-L 42.5 R : 60,97 %, CEM II B-L 32.5 R : 59,47 %.

Cette diminution du pourcentage de "chaux" (CaO) s'explique par la réduction du pourcentage de clinker, qui en est la principale source, et par l'augmentation du pourcentage de calcaire (carbonate de calcium, CaCO_3).

On remarque dans les résultats que les teneurs en SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3 diminuent avec l'augmentation du pourcentage de calcaire et la diminution du pourcentage de clinker.

Cela s'explique par le fait que ces oxydes sont principalement présents dans le clinker, tandis que le calcaire ne les contient pas.

III.2.3.DRX:

L'analyse par diffraction des rayons X a pour but de savoir les phases obtenues. Les résultats de cette analyse sont donnés dans le Tableau III.3 et la Figure III.2.

Tableau III.3: Résultats d'analyse DRX.

	Alite (C_3S)	Belite beta (C_2S)	Celite (C_3A)	Ferrite (C_4AF)
CEM I 42.5R	59.62	14.94	4.13	6.73
CEM II A-L42.5R	47.51	14.74	13.24	6.59
CEM II B-L32.5R	46.63	10.92	19.57	5.60

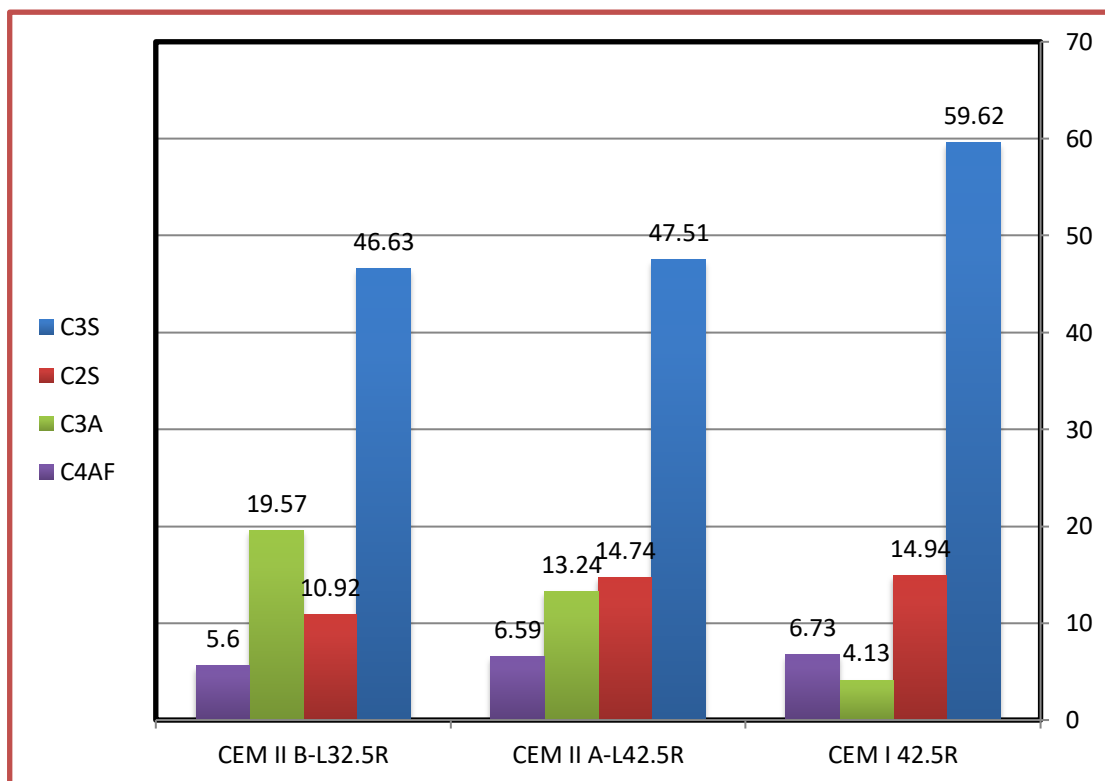


Figure III.3: Variation des compositions minéralogiques.

Discussion :

à travers les résultats de l'analyse DRX que plus la teneur en clinker diminue et qu'elle est remplacée par du calcaire, plus les pourcentages des phases minérales C_3S (alite), C_2S (bélite) et C_4AF (ferrite) diminuent.

Cette diminution s'explique par le fait que ces composés constituent les éléments principaux du clinker ; ainsi, une réduction de sa proportion entraîne logiquement une baisse de ces phases dans le ciment final.

III.3.Analyses mécaniques, physiques:

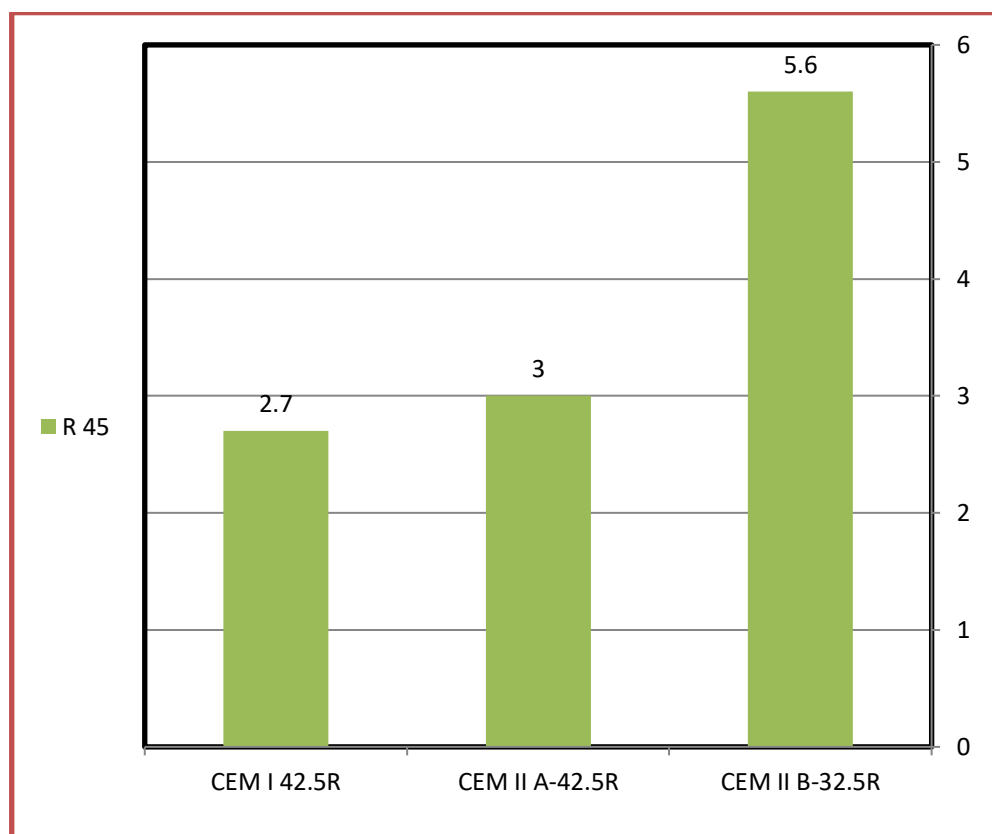
III.3.1.Analyses physiques:

III.3.1.1.Refus:

Les résultats obtenus du refus sont illustrés dans le Tableau III.4 et la Figure III.4

Tableau III.4: Résultats de refus 45 μ .

Types de ciment	R 45
CEM I 42.5R	2.7
CEM II A-L 42.5R	3
CEM II B-L 32.5R	5.6



FigureIII.4: Variation de refus 45 μ

Discussion :

À partir des résultats, on remarque une augmentation du résidu R45 avec l'augmentation du pourcentage de calcaire et la diminution du pourcentage de clinker:

- CEM I 42.5 R : Clinker 93 %, Calcaire 2 % $\rightarrow$ R45 = 2,7 %.
- CEM II A-L 42.5 R : Clinker 80 %, Calcaire 15 % $\rightarrow$ R45 = 3 %.
- CEM II B-L 32.5 R : Clinker 65 %, Calcaire 30 % $\rightarrow$ R45 = 5,6 %

Cette augmentation du résidu (R45) s'explique par la réduction du clinker, qui est généralement broyé plus finement que le calcaire.

Plus la quantité de clinker est élevée, plus la finesse du ciment augmente, ce qui entraîne une diminution de la valeur du résidu R45.

À l'inverse, une réduction de la teneur en clinker, compensée par une augmentation du calcaire, conduit à une augmentation du résidu R45, car le calcaire est généralement moins finement broyé que le clinker.

III.3.1.2.La surface spécifique par la méthode Blaine (SSB) :

Après l'étude de la surface spécifique par la méthode Blaine, nous avons obtenu les valeurs suivantes, comme illustré dans le Tableau III.5 et la Figure III.5

Tableau III.5: Résultats de SSB.

Types de ciment	SSB (cm ² /g)
CEM I 42.5R	3618
CEM II A-L 42.5R	4036
CEM II B-L 32.5R	4418

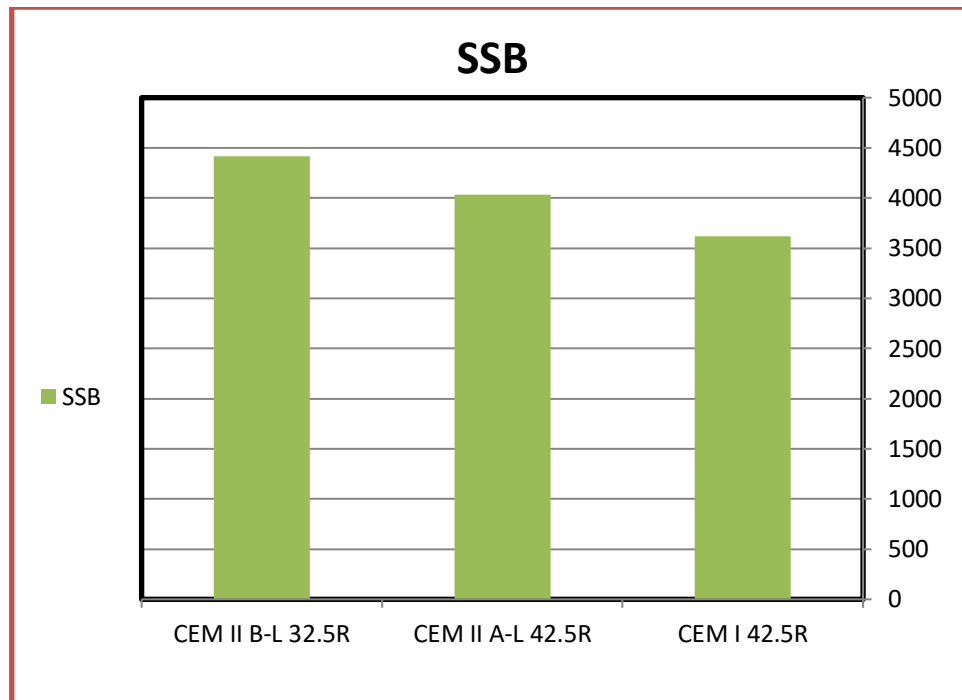


Figure III.5: Variation de SSB.

Discussion :

On remarque à partir des résultats que la surface spécifique Blaine (SSB) augmente avec l'augmentation du pourcentage de calcaire, ce qui s'explique par l'augmentation du nombre de particules

III.3.2. Analyses mécaniques:**III.3.2.1. Résistance mécanique:**

Après l'analyse chimique, il faut faire l'analyse mécanique des échantillons étudiés pour cela nous avons fait les analyses suivantes : résistance à la compression et à la flexion. Les résultats obtenus sont illustrés dans le Tableau III.6 et la Figure III.6 et Figure III.7.

Tableau III.6: Résultat de compression et flexion.

Types de ciment	Résistance à la compression (MPa)			Résistance à la flexion (MPa)		
	2 jours	7 jours	28 jours	2 jours	7 jours	28 jours
CEM I 42.5R	27.5	42.3	55.6	5.5	6.9	9
CEM II A-L 42.5R	24	38.6	48.5	4.9	6.8	8
CEM II B-L 32.5R	20.5	35.7	37.3	4.1	6.1	7

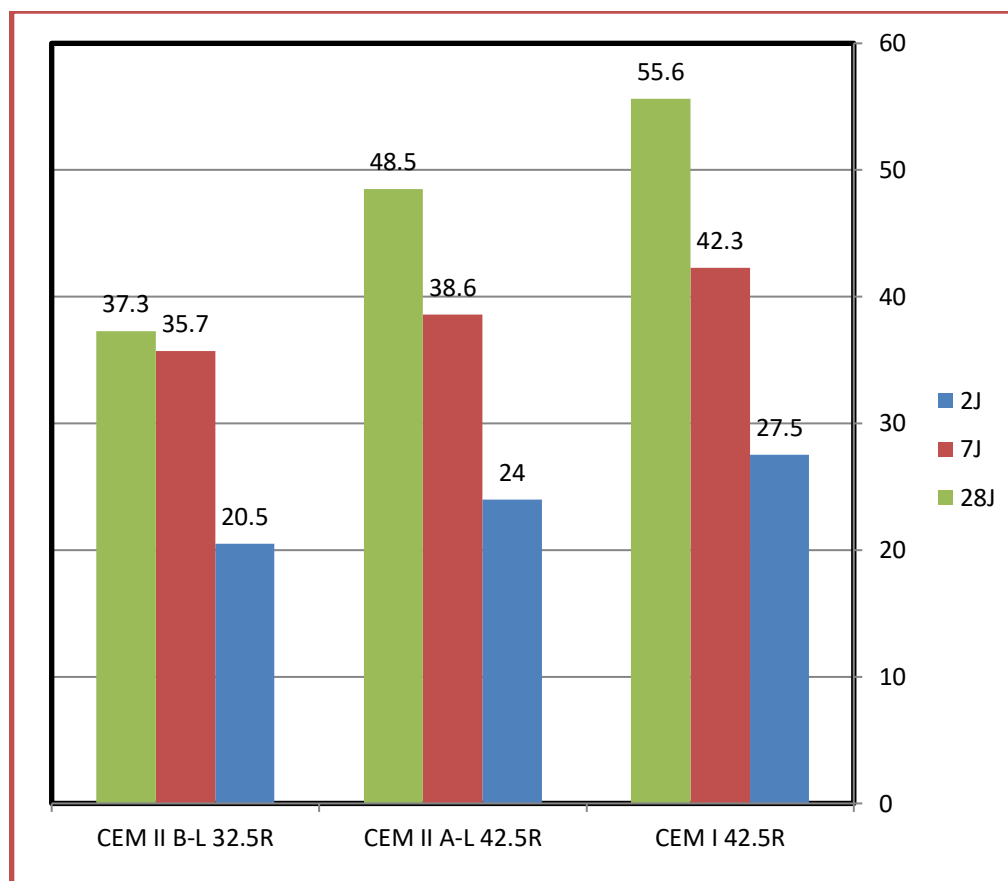


Figure III.6: Variation de la résistance à la compression.

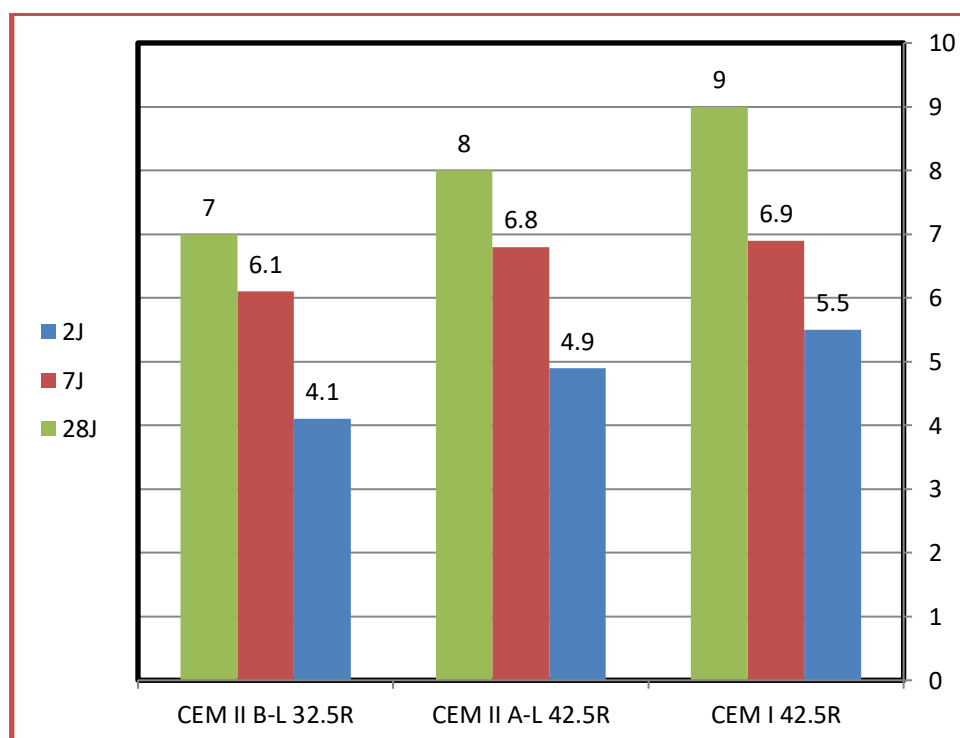


Figure III.7 : Variation de la résistance à la flexion.

Discussion :

On remarque que les résultats de résistance à la compression sont conformes à la norme EN 196-1:

- CEM I 42.5R: 2 jours $\longrightarrow R_c = 27.5 \text{ MPa} \geq 20,0 \text{ MPa}$.

$$28 \text{ jours} \longrightarrow R_c = 55.6 \text{ MPa} \geq 42.5 \text{ MPa}.$$

- CEM II A-L 42.5R: 2 jours $\longrightarrow R_c = 24 \text{ MPa} \geq 20,0 \text{ MPa}$.

$$28 \text{ jours} \longrightarrow R_c = 55.6 \text{ MPa} \geq 42.5 \text{ MPa}.$$

- CEM II B-L 32.5R: 2 jours $\longrightarrow R_c = 20.5 \text{ MPa} \geq 10,0 \text{ MPa}$.

$$28 \text{ jours} \longrightarrow R_c = 37.3 \text{ MPa} \geq 32.5 \text{ MPa}.$$

On remarque que, plus le pourcentage de clinker augmente, plus la résistance à la compression augmente. Lorsque ce pourcentage de clinker diminue, la résistance à la compression diminue également. C'est la même chose pour la résistance à la flexion. Il existe donc une relation directe entre le pourcentage de clinker et les résistances mécaniques (compression et flexion).

Le clinker est le principal responsable du développement de la résistance mécanique du ciment.

III.4.La durabilite:**III.4.1.La résistance à la compression du béton:**

Les résultats de la résistance à la compression du béton avec et sans adjuvant sont présentés dans le Tableau III.7 et les Figures III.7 et III.8

Tableau III.7: Résultat de la résistance à la compression du béton avec et sans adjuvant.

Types de ciment	Adjuvant	Résistance à la compression du béton (MPa).		
		2 jours	7 jours	28 jours
CEM I 42.5R	Sans	26.19	34.78	38.09
	Avac	51.14	54.62	62.82
CEM II A-L 42.5R	Sans	21.96	31.27	33.46
	Avac	34	46.45	59.61
CEM II B-L 32.5R	Sans	12.84	19.14	22.33
	Avac	34.01	41.2	49.23

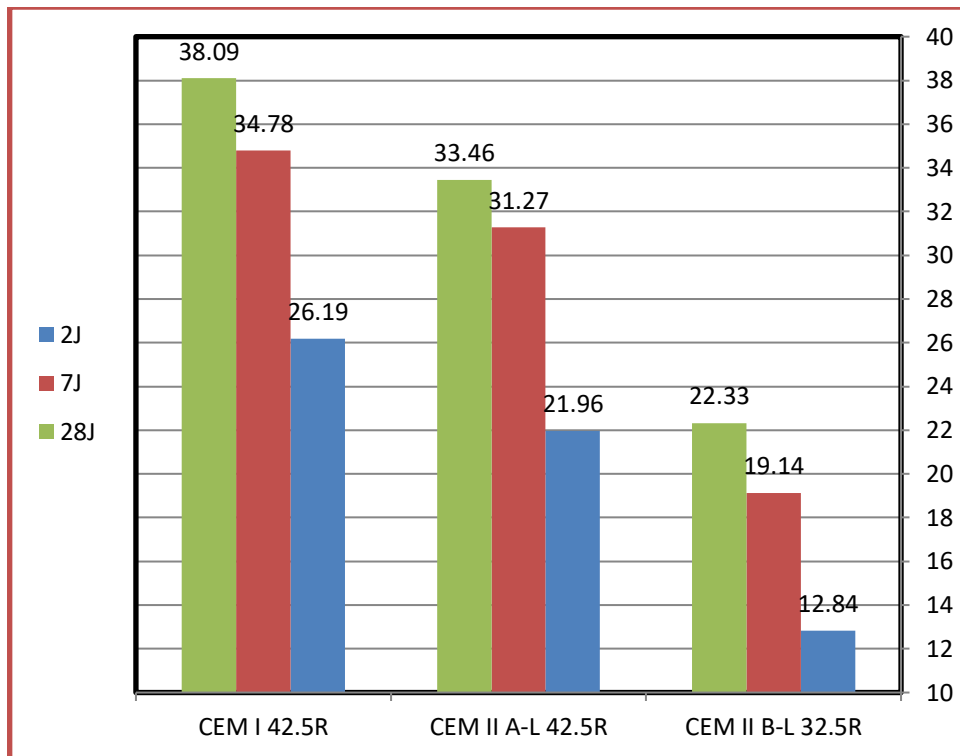


Figure III.8 : Variation de la résistance à la compression du béton sans adjuvant.

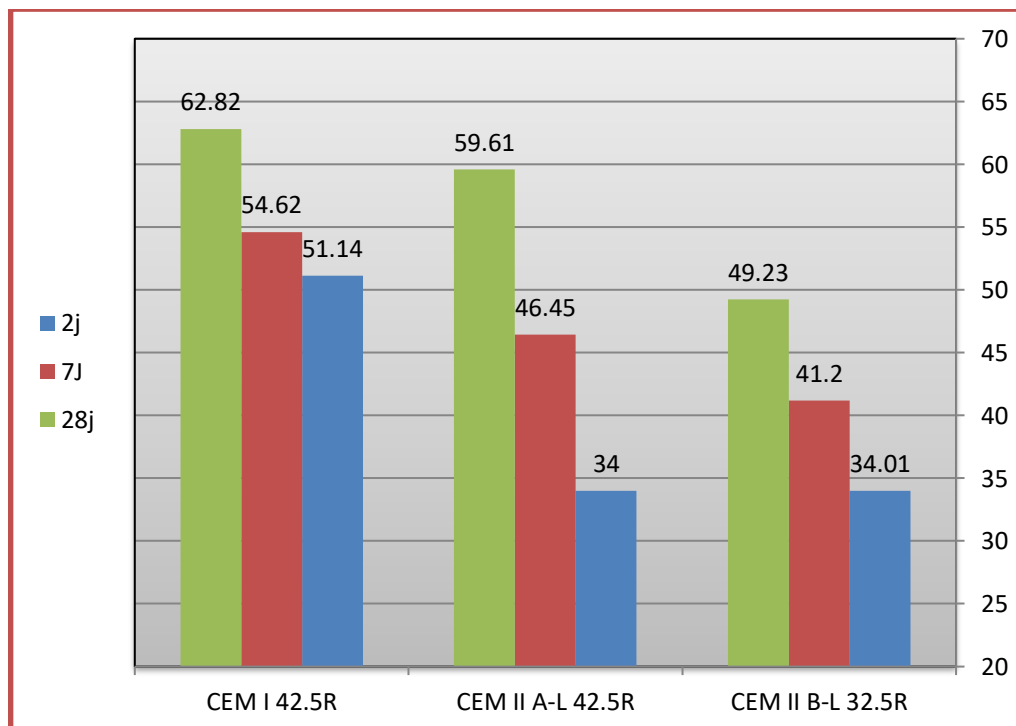


Figure III.9 : Variation de la résistance à la compression du béton avec adjuvant.

Discussion :

À partir des résultats, on remarque que la résistance à la compression du béton augmente avec l'augmentation du pourcentage de clinker, et diminue lorsque ce pourcentage diminue.

La résistance à la compression du béton fabriqué avec le ciment CEM I 42.5R est nettement supérieure à celle obtenue avec le CEM II B-L 32.5R, et cela à tous les âges de cure (2, 7 et 28 jours).

a) Sans adjuvant:

2J → $R_c(\text{CEM I 42.5R}) = 26.19 \text{ MPa} >> R_c(\text{CEM II B-L 32.5R}) = 12.84 \text{ MPa}$.

7J → $R_c(\text{CEM I 42.5R}) = 34.78 \text{ MPa} >> R_c(\text{CEM II B-L 32.5R}) = 19.14 \text{ MPa}$.

28J → $R_c(\text{CEM I 42.5R}) = 38.09 \text{ MPa} >> R_c(\text{CEM II B-L 32.5R}) = 22.33 \text{ MPa}$.

b) Avec adjuvant:

2J → $R_c(\text{CEM I 42.5R}) = 51.14 \text{ MPa} >> R_c(\text{CEM II B-L 32.5R}) = 34.01 \text{ MPa}$.

7J → $R_c(\text{CEM I 42.5R}) = 54.62 \text{ MPa} >> R_c(\text{CEM II B-L 32.5R}) = 41.2 \text{ MPa}$.

28J → $R_c(\text{CEM I 42.5R}) = 62.82 \text{ MPa} >> R_c(\text{CEM II B-L 32.5R}) = 49.23 \text{ MPa}$.

Le clinker est un élément essentiel pour l'augmentation de la résistance à la compression du béton.

Comme on le remarque, la résistance à la compression du béton augmente nettement avec l'ajout de l'adjuvant, pour les trois types de ciment (à 2, 7 et 28 jours), par rapport aux résultats sans adjuvant.

Le Sika® ViscoCrete® Tempo 12 augmente la résistance à la compression du béton, surtout pour les ciments contenant une faible teneur en clinker comme le CEM II B-L 32.5R.

28J → $R_c(\text{CEM II B-L 32.5R avec adjuvant}) = 49.23 \text{ MPa} >> R_c(\text{CEM II B-L 32.5R sans adjuvant}) = 22.33 \text{ MPa}$.

L'adjuvant augmente la résistance à la compression du béton.

III.5. Le coût:

Après avoir analysé l'influence du rapport C/K sur les performances et la durabilité des différents types de ciment, il est également pertinent de prendre en compte l'aspect économique.

L'industrie du ciment repose en grande partie sur la production de clinker, qui en constitue la composante principale. Le clinker est aussi l'élément le plus coûteux, en raison de sa fabrication particulièrement énergivore : elle nécessite des températures très élevées (environ 1450 °C), une grande consommation de carburant, ainsi que du personnel pour l'entretien des fours, en plus d'autres coûts opérationnels. De plus, la production de clinker représente l'une des principales sources d'émission de dioxyde de carbone (CO₂) dans le secteur de la construction.

III.6.Comparaison des différents types de ciment (performance, durabilité et coût) :

Après la comparaison des types de ciments utilisés, nous avons abouti aux résultats suivants, comme illustré dans le Tableau III.8.

Tableau III.8: Comparatif des types de ciment selon le rapport C/K, la performance, la durabilité et le coût.

Types de ciment	C/K	performance	durabilité	coût estimé
CEM I 42.5R	1.08	Très bonne	Excellente	Élevé
CEM II A-L 42.5R	1.25	Bonne	Bonne	Moyen
CEM II B-L 32.5R	1.54	Moyenne	Moyenne	Faible



CONCLUSION GÉNÉRALE

À travers cette étude sur l'effet du rapport C/K (ciment/clinker) dans les trois types de ciments (CEM I 42.5R, CEM II A-L 42.5R, CEM II B-L 32.5R), il a été démontré que l'ajout de calcaire et la réduction de la teneur en clinker influencent directement les propriétés physiques et mécaniques du ciment.

Les résultats obtenus nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

Plus le rapport C/K est élevé, plus les valeurs de la perte au feu (PAF), du refus sur tamis 45 μm , et de la surface spécifique Blaine (SSB) augmentent.

- La perte au feu (PAF) passe de 2.7 % dans le CEM I 42.5R à 8.21 % dans le CEM II B-L 32.5R.
- La surface spécifique maximale (SSB) a été enregistrée pour le CEM II B-L 32.5R avec 4418 cm^2/g , contre 3618 cm^2/g dans le CEM I 42.5 R.

En revanche, le rapport C/K influence inversement la résistance à la compression et à la flexion :

- Une diminution de ce rapport (donc une augmentation du clinker) améliore les résistances mécaniques.
- Le CEM I 42.5R a montré la meilleure résistance à la compression à 28 jours (55,6 MPa), tandis que le CEM II B-L 32.5R a affiché la plus faible (37,3 MPa).

Les analyses DRX ont révélé une diminution du C_3S (alite), passant de 59,62 % dans le CEM I à 46,63 % dans le CEM II B-L 32.5R.

Ainsi, le ciment CEM I 42.5R offre les meilleures performances en matière de résistance et de durabilité, mais avec un coût plus élevé et un impact environnemental accru à cause de la forte teneur en clinker.

À l'inverse, le CEM II B-L 32.5R, bien que moins performant, reste plus économique et écologique, adapté aux ouvrages ne nécessitant pas de hautes performances.

En conclusion, le choix du type de ciment doit se faire selon la nature du projet, en équilibrant les exigences techniques, les coûts, et les enjeux environnementaux.

ملخص :

يهدف هذا العمل إلى دراسة تأثير نسبة الأسمنت/الكلنكر (C/K) على الخصائص الميكانيكية والأداء لأنواع مختلفة من الأسمنت المنتجة على مستوى شركة "البسكرية للإسمنت". يُعدّ هذا الموضوع ذا أهمية كبيرة في ظل التوجهات الصناعية الحديثة الرامية إلى تقليص نسبة الكلنكر في تركيبة الأسمنت بهدف تقليل التكاليف والحد من الأثر البيئي، مع الحفاظ على الجودة والمتانة.

أظهرت نتائج مقاومة الضغط بعد 28 يومًا أن الإسمنت من النوع CEM I 42.5R يُسجّل أعلى مقاومة، بلغت 55.6 ميغاباسكال، في حين سجّلت أدنى مقاومة في الإسمنت من النوع CEM II B-L 32.5R، بقيمة 37.3 ميغاباسكال.

كما كشفت تحاليل الأشعة السينية للأطوار البلورية (DRX) عن انخفاض ملحوظ في نسبة C_3S حيث تراجعت من 59.62 % في CEM I 42.5R إلى 46.63 % في CEM II B-L 32.5R.

Résumé:

Ce travail a pour objectif d'étudier l'effet du rapport ciment/clinker (C/K) sur les propriétés mécaniques et les performances de différents types de ciments produits au niveau de l'entreprise S.P.A BISKRIA CIMENT. Ce sujet revêt une grande importance dans le contexte des orientations industrielles actuelles visant à réduire la teneur en clinker dans la composition du ciment afin de diminuer les coûts et de limiter l'impact environnemental, tout en préservant la qualité et la durabilité.

Les résultats de la résistance à la compression après 28 jours ont montré que le ciment de type CEM I 42.5R présente la résistance la plus élevée, atteignant 55,6 MPa, tandis que la résistance la plus faible a été enregistrée pour le ciment de type CEM II B-L 32.5R, avec une valeur de 37.3 MPa.

Les analyses par diffraction des rayons X (DRX) ont également révélé une diminution notable de la teneur en C_3S (alite), passant de 59,62 % dans le CEM I 42.5R à 46,63 % dans le CEM II B-L 32.5R.

Abstract:

This work aims to study the effect of the cement/clinker ratio (C/K) on the mechanical properties and performance of different types of cement produced by the company S.P.A BISKRIA CIMENT. This topic is of great importance in light of current industrial trends aimed at reducing the clinker content in cement formulations in order to lower costs and minimize environmental impact, while maintaining quality and durability.

The results of the compressive strength tests after 28 days showed that the cement type CEM I 42.5R had the highest strength, reaching 55.6 MPa, while the lowest strength was recorded for the cement type CEM II B-L 32.5R, with a value of 37.3 MPa.

X-ray diffraction (XRD) analyses also revealed a significant decrease in C_3S (alite) content, dropping from 59.62% in CEM I 42.5R to 46.63% in CEM II B-L 32.5R



RÉFÉRENCES

Références:

- [1] **H Bari** " Impact taux d'ajouts sur les propriétés physico-mécanique du produit ciment" "mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra" 2021 – 2022.
- [2] Disponible en ligne sur site:
<https://grey.biskriaciment.com/presentationbiskria> consulté 13/04/2025
- [3] **A HARZELLI** " Etude sur les leviers et les paramètres qualité de production pour l'augmentation de ciment sur clinker C/K" " mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra" 2022 – 2023.
- [4] **S ZERIGUET** " Impact de l'oxyde de fer et les oxydes Mineurs sur la blancheur de produit fini de ciment blanc" "mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra" 2023– 2024.
- [5] Disponible en ligne sur site: <https://www.febelcem.be/fr/ciment>
beton/historique-du-ciment/ consulté 13/04/2025
- [6] **A.ZENNOUCHE, CH.BENMAHFOUD,**" Compatibilité ciment au laitier-
super plastifiants. Application à l'étude du comportement rhéologique et physico-
mécanique des BAP "," Mémoire de Master, Université M'HAMED BOUGARA"
Algérie, 2016.
- [7] **H. Mebarki** " Etude comparative des clinkers de l'ouest Algérien : Analyse
Physicochimique et Applications" " mémoire de master, université de Tlemcen"
Algérie 2013.
- [8] **A ZIOUECHE** " L'impact de noyau d'olive sur le ciment " " mémoire de
master,UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA" 2022-2023.
- [9] **R HAMIA**" Calculer de Bilan aéraulique et énergétique pour une ligne de
production de 500KT de clinker" "mémoire de master, Université Mohamed
Khider de Biskra" 2022 – 2023.
- [10] **S.DAHMANI** "Effet de l'association laitier-calcaire sur les caractéristiques
physico-chimiques et mécaniques de ciments ", "Mémoire de Master, Université
MOHAMED BOUDIAF- M'sila" 2015-2016.

- [11] **CH SELLAOUI** "Etude comparative des propriétés rhéologiques des pâtes de ciments" "mémoire de master, Université 8 Mai 1945 de Guelma" 2023.
- [12] **L AGLI** " Calcule RAW MIX DESIGN pour la fabrication d'un ciment blanc 52,5 N" "mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra" 2021 – 2022.
- [13] Disponible en ligne sur site: <https://www.schb.dz/processus-de-fabrication-du-ciment/> . consulté 13/04/2025
- [14] **L. AGLI** " Calcule RAW MIX DESIGN pour la fabrication d'un ciment blanc 52,5 N", "Mémoire de master, Université Mohamed khaidr Biskra, 2022.
- [15] **D. RAHOU** " Analyse énergétique d'un calcinateur de cimenterie" " mémoire de master, Université Saad Dahlab Blida" 2011-2012.
- [16] Disponible sur site: <https://www.infociments.fr/ciments/fabrication-du-ciment-le-process/le-prechauffage-du-cru> consulté 13/04/2025.
- [17] **CYRIL Guérandel**, " Etude de la qualité du piégeage des matières organiques par la matrice cimentaire vis-à-vis de la lixiviation "Thèse de doctorat, Université Paul Verlaine – Metz, 2009.
- [18] **A.GHERMAOUI** " Effets de certains métaux sur les propriétés physico des mortiers de ciment de Béni pouzzolane" "Mémoire du master" Université Aboubaker belkaid- Tlemcen, 2015.
- [19] EN 196-1, AFNOR , SEPTEMBRE 2016.
- [20] Disponible en ligne sur site: <https://www.arwconcretefloors.co.uk/specialist/cube-testing/> consulté 22/05/2025
- [21] Disponible en ligne sur site: <https://fr.dreamstime.com/marque-concr%C3%A8te-cube-%C3%A9tiquetage-essai-kuala-lumpur-malaisie-f%C3%A9vrier-identifier-concret-commence>.consulté 22/05/2025.
- [22] Disponible en ligne sur site: <https://www.ceg.tn/storage/documents/produits/p1d4ihp3uot0n1vm37g0iuh159c7.pdf>. consulté 13/04/2025

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

بسكره في: 2025 / 06 / 24

جامعة محمد خيضر - بسكره
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم الكيمياء الصناعية

إذن بإيداع مذكرة الماستر بعد التصحيحات

أنا الماضي أسفله الأستاذ: ديغش كلوم

الرتبة: أستاذ محاضراً (MCA)

أستاذ مشرف على مذكرة ماستر - للطالب (ة): عماني شبيب

الشعبة: هندسة الطرائق

التخصص: هندسة كيميائية

عنوان: E'tude comparée des ciments avec différents ratios C/A
performance, coût et durabilité.

أرخص بإيداع المذكرة المذكورة.

رئيس لجنة المناقشة

PI

الأستاذ المشرف

ديغش

ملحق القرار رقم: 933 المؤرخ في: 20 جويلية 2016

الذي يحدد القواعد المتعلقة بالوقاية من السرقة العلمية ومكافحتها

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

مؤسسة التعليم العالي:

نموذج التصريح الشرفي

خاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لانجاز بحث

أنا الممضي أدناه،

السيد: محمّد بن عبد الحميد... الصفة: طالب، أستاذ باحث، باحث دائم: طالب.....

الحامل لبطاقة التعريف الوطنية رقم: 1092532006 والصادرة بتاريخ: 14/11/2016

المسجل بكلية: تعليم... تكنولوجيا... قسم: الكيمياء... البيئية.....

و المكلف بإنجاز أعمال بحث (مذكرة التخرج ، مذكرة ماستر ، مذكرة ماجستير ، أطروحة

دكتوراه)، عنوانها: Étude comparative des ciments avec différents.....

ratios C/A : performance, coût et durabilité.....

أصرح بشرفي أنني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية ومعايير الأخلاقيات المهنية والنزاهة الأكاديمية المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ: 29/10/2016

إمضاء المعني

محمّد بن عبد الحميد