

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Dr. Tahar Moulay SAIDA
Faculté de Technologie
Département de Génie des procédés



جامعة د الطاهر مولاي سعيدة
كلية التكنولوجيا
قسم : هندسة الطرائق

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE
Pour l'obtention du diplôme Master
En Génie des procédés
Option : Génie des Procédés des Matériaux

Présenté par :

Kounouz TALHA&Zahra FODIL

***Etude des propriétés physico-chimiques du
ciment produit à partir du cru de la
cimenterie de Saïda***

Soutenu le .../06/2022

Devant le jury :

Dr Y. AIMER	Maître de Conférences B	Université de Saida	Président
Dr Med. BOUDINAR	Maître de Conférences B	Université de Saida	Examineur
Mme O. BELARBI	Maitre- Assistant A	Université de Saida	Rapporteur

Promotion : 2021-2022

Résumé

Cette présente étude vise à étudier le ciment produit à base du clinker fabriqué par la cimenterie de Saida en caractérisant l'effet de la composition initiale (matières premières) et en particulier l'influence des ajouts. Le comportement à l'état frais et à l'état durci ainsi que la durabilité des ciments à base de clinker de la SCI-Saida ont été investis. Les ajouts proposés sont le calcaire actuellement utilisé par la cimenterie de Saida et un déchet de démolition : déchet céramique. Outre l'intérêt économique que présentent les ajouts cimentaires, notre étude a montré que 10% d'ajout calcaire donne un ciment CEMII dans les normes et que le ciment au déchet céramique présente une bonne durabilité aux milieux agressifs. Les résistances à la compression, indiquent que les CPJ 10% calcaire présentent les meilleurs résultats notamment à long terme. Les résultats des essais de l'attaque acide (H_2SO_4), et du milieu naturel, montrent que le déchet céramique a une influence sensiblement meilleure que celle du calcaire sur la durabilité du ciment dans le quel il est incorporé.

Mots clés : cimenterie de Saida - calcaire –déchet céramique – argile – clinker –Résistances mécaniques-ajouts

Abstract

The aim of this study is to study the clinker-based cement produced by the Saida cement plant by characterising the effect of the initial composition (raw materials) and in particular the influence of additions. The behaviour in the fresh and hardened state as well as the durability of the clinker-based cements of SCI-Saida has been invested. The proposed additions are limestone currently used by the Saida cement plant and demolition waste: ceramic waste. In addition to the economic value of cementitious additions, our study showed that 10% of limestone addition gives a CEMII cement in the standards and that the material with ceramic waste has a good durability in aggressive environments. The compression resistance indicates that CPJ 10% limestone have the best results especially in the long term. The results of the acid attack (H_2SO_4) and natural slag tests show that ceramic waste has a significantly better influence on the durability of the sediment than limestone.

Keywords: Saida cement plant - limestone - ceramic waste - clay - clinker - mechanical resistances-additions

المخلص

الهدف من هذه الدراسة هو دراسة الأسمنت القائم على الكلنكر الذي ينتجه مصنع سعيدة للأسمنت من خلال تحديد تأثير الغرض من هذه الدراسة هو دراسة الأسمنت المنتج من الكلنكر الذي ينتجه مصنع سعيدة للأسمنت بتوصيف تأثير التركيبة الأولية ولا سيما تأثير الإضافات. وكذلك تركيبة الاسمنت من حيث الحالة الأولية و صلابته. بحيث تم استثمار الاسمنت القائم على الكلنكر من طرف مصنع سعيدة باضافة الحجر الجيري المستخدم حاليًا ونفايات الهدم المقترحة : نفايات السيراميك. إلى أن دراستنا أظهرت أن إضافة 10% من الحجر الجيري تعطي أسمنت CEMII في المعايير وأن نفايات السيراميك لها صلابة جيدة في الأوساط الحمضية. دراسة مقاومة الضغط، تشير إلى أن الحجر الجيري CPJ بنسبة 10% لديه مقاومة قصوى. تظهر نتائج اختبار الاسمنت بحمض الكبريت (H_2SO_4) و في الأوساط المعتدلة أن نفايات السيراميك لها تأثير أفضل بكثير من الحجر الجيري على صلابة الاسمنت الذي تم دمجه فيه.

الكلمات المفتاحية: مصنع اسمنت سعيدة، حجر جيري، نفايات السيراميك، الطين، الكلنكر، مقاومات ميكانيكية، اظافات.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail et ma profonde gratitude

*A tous ceux qui se sont sacrifiés pour m'offrir les conditions propices à ma
réussite :*

*A ma mère, à qui je dois la réussite, pour l'éducation qu'elle m'a prodiguée;
avec tous les moyens et au prix de tous les sacrifices qu'elle a consenti à faire à
mon égard, pour le sens du devoir qu'elle m'a enseigné depuis mon enfance.*

A mon père, tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager.

Que ce travail traduit ma gratitude et mon affection.

*A mon encadreur Madame Belarbi Ouassyla, pour sa disponibilité et qui a assuré le bon
déroulement de mon projet de fin d'étude.*

A mes très chers frères Abdallah et Adem

*A mes amies Benzada Soumaya et Talha Nadjjet, qui m'ont épaulées
dans les jours difficiles*

Sans oublier mon amie, mon binôme Fodil Zahra

*A tous mes amis et ma famille qui m'ont toujours encouragé, et à qui je souhaite plus de
succès.*

Kounouz

Dédicaces

A cœur vaillant rien d'impossible, à conscience tranquille tout est accessible

Quand il y a la soif d'apprendre, tout vient à point à qui sait attendre

Malgré les obstacles qui s'opposent, en dépit des difficultés qui s'interposent

Souhaitant que le fruit de nos efforts fournis, jour et nuit, nous mène vers

le bonheur fleuri

Je dédie ce modeste travail

A ma très chère mère, affable, honorable, aimable, tu représentes pour moi

la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de

m'encourager et prier pour moi, Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un

grand secours pour mener à bien mes études.

A mon très cher père, rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon

éducation et mon bien être, ce travail est le fruit de tes sacrifices que

tu as consenti pour mon éducation et ma formation

Je vous dédie ce travail.

A mon directeur de mémoire Mme BELARBI Ouassyla

A mes très chers frères Imed, Amine et Ishak.votre affection et votre soutien m'ont

été d'un grand secours au long de ma vie, les mots ne suffisent guère pour

exprimer l'attachement, l'amour et l'affection que je porte pour vous

A mes chère(s) ami(e)s et à toute la promotion 2017-2022

Vous êtes pour moi des frères et sœurs et des ami(e)s sur qui je peux compter,

je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur, de santé et de réussite.

Sans oublier ma meilleure amie, mon binôme Talha Kounouziavec qui j'ai partagé ce travail.

Zahra

Remerciements

En premier lieu, nous tenons à remercier Dieu, notre créateur de nous avoir donné la force pour accomplir ce travail.

Nous tenons à remercier Mme **Belarbi Ouassyla**, notre Encadreur pour son aide, sa patience, son grand soutien et ses conseils considérables.

Nous voudrions également remercier Mr **Y. Aimer**, maitre de conférences B à l'université Dr Moulay Tahar, pour avoir accepté de présider le jury de ce travail, ainsi que Mr. **Med Boudinar** maitre de conférences B à l'université Dr Moulay Tahar pour l'intérêt qu'il a porté à notre projet en acceptant d'être membre de ce jury.

Nos vifs et sincères remerciements s'adressent également aux cadres de la cimenterie El Hssasna, nous citons particulièrement Mr. **Chikh Ouazzane** ingénieur au laboratoire de contrôle qualité pour son aide précieuse et d'avoir partagé avec nous son expérience professionnelle et son savoir dans le domaine cimentier. Que Mme. **Fatiha kadi** chef du laboratoire contrôle qualité, trouve ici notre gratitude pour nous avoir assuré le bénéfice d'un encadrement professionnel indispensable au niveau de la chaine de production de ciment. Un grand merci à tout le personnel de la cimenterie de Saida qui ont accepté de nous faire profiter de leur expérience de terrain pendant les travaux d'échantillonnage et d'investigations au cours de l'élaboration de notre projet de fin d'études.

Notre profonde reconnaissance s'adresse également au Laboratoire des Travaux Publics Ouest de la wilaya de Saida qui nous ont accueilli et accepté de procéder aux différentes analyses de nos échantillons. Nous pensons particulièrement à **Mme Saria Zohra**, **Mme Aissaoui Halima** et **Mr Dahmani Abdelkarim** ingénieures au laboratoire LTPO. Qu'ils trouvent ici l'expression de notre reconnaissance pour leur contribution aux différents tests effectués ainsi que leur orientation qui n'a pas été de moindre envergure.

Nous adressons enfin notre gratitude à tous les membres de nos familles pour leur soutien moral, social ou financier pendant toute la durée de notre cursus, sans oublier tous les enseignants qui se sont succédés tout le long de cette période.

Nos vifs remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Sommaire

Titre	Page
Résumé.....	I
Remerciements.....	II
Sommaire.....	III
Liste des figures.....	VII
liste des tableaux.....	X
Liste des abréviations.....	XII
Introduction générale.....	1

Chapitre I : Technologie du ciment

I.1-Introduction.....	4
I.2-Le ciment.....	4
I.3.Constituants du ciment.....	4
I.4-Paramètres d'optimisation du cru cimentier	5
I.4.1-LSF (Facteur de saturation en chaux).....	5
I.4.2-MS (Module silicique).....	6
I.4.3-MF (Module Fer).....	6
I.4.4- HM(Module hydratation).....	6
I.5- Procédé de fabrication du ciment adopté par la cimenterie de Saida	6
I.5.1-Extraction des matières premières	7
I.5.2-Concassage.....	7
I.5.3-Broyage de cru.....	8

I.5.4- Homogénéisation.....	8
I.5.5-Zone de cuisson.....	9
I.5.5.1- Préchauffeur.....	9
I.5.5.2- Four rotatif.....	9
I.5.5.3- Refroidisseur.....	10
I.5.6-Stockage et expédition.....	10
I.6-Le clinker.....	11
I.6.1-Composition chimique du clinker	12
I.6.2-Composition minéralogique moyenne du clinker.....	12
I.7-Processus d'hydratation.....	14
I.8-Ajouts cimentiers (Additions cimentaires)	18
I.8.1-les ajouts minéraux actifs	19
I.8.1.1- La pouzzolane	19
I.8.1.2-Pouzzolane artificielle	19
I.8.1.3-La fumée de silice.....	19
I.8.1.4-Laitiers de hauts fourneaux.....	19
I.8.1.5-Les cendres volantes siliceuses (V) ou calciques (W).....	19
I.8.2-Les ajouts inertes	20
I.8.2.1- Fillers calcaires	20
I.8.2.2-Les céramiques	21
I.9- Valorisation des déchets de céramique	22

Chapitre II : Matériels et Méthodes

II.1-Introduction.....	24
II.2-Analyse spectrale.....	24
II.2.1- Analyse par spectrométrie de fluorescence des rayons X.....	24
II.3- Analyse chimique.....	25
II.3.1-Détermination de la chaux libre CaO_L	25
II.4-Analyse physique.....	26
II.4.1-Détermination de la finesse des ciments	26
II.4.2- Détermination de la consistance normalisée.....	27
II.4.3-Détermination du temps de prise	29
II.4.3.1- Détermination du temps de début de prise.....	29
II.4.3.2- Détermination du temps de fin de prise	30
II.4.4- Détermination de la consistance normalisée	30
II.4.5- Détermination des résistances mécaniques	32
II.4.5.1- Résistance à la flexion	34
II.4.5.2- Résistance à la compression.....	34
II.4.6- Détermination de la surface spécifique de Blaine	35
II.5-Analyse gravimétrique	35
II.5.1-Détermination de la perte au feu PAF.....	36
II.5.2-Détermination du taux d'humidité	36
II.6-Analyse granulométrique du sable	36
II.7-Essai d'équivalent de sable (ES).....	37

II.8-Masse volumique apparente du sable.....	38
II.9-Masse volumique absolue.....	39
II.10-Analyse granulométrique.....	40
II.11-Taux d’Absorption d’eau	41
II.12-Essai du bleu de méthylène.....	42
II.13-Lixiviation	43
II.14-Durabilité de mortiers dans l’eau et dans un milieu acide.....	44

Chapitre III:Caractérisation des matières premières utilisées dans la cimenterie de Saida

III.1-Introduction.....	45
III.2- Provenance et propriétés des matières premières.....	45
III.2.1-Matières premières du cru de la cimenterie de Saida.....	46
III.2.1.1-Calcaire.....	46
III.2.1.2-Argile.....	48
III.2.2-Correcteurs.....	50
III.2.2.1-Minerais de fer.....	50
III.2.2.2-Sable	51
III.3-Caractérisation du cru préparé par la cimenterie de Saida.....	54
III.4-Caractérisation du clinker produit par la cimenterie de Saida	54
III.4.1-Estimation des modules chimiques de saturation (clinker)	55
III.5-Ajouts secondaires.....	56
III.5.1-Gypse.....	56
III.5.2-Déchets de céramiques.....	57

III.6-Valeurs au bleu de méthylène des ajouts utilisés.....	58
III.7-Taux d'humidité des ajouts utilisés.....	59
III.8-Taux d'absorption d'eau (Ab) des ajouts utilisés.....	59
III.9-Masse volumique (Pab) des additions cimentaires utilisées.....	60
III.10-Conclusion.....	60

Chapitre IV : Caractérisation des ciments confectionnés

IV.1-Introduction.....	61
IV.2- Caractérisation des ciments anhydres	61
IV.3-Composition chimique des ciments CPJ confectionnés	62
IV.4-Granulométrie des ciments CPJ confectionnés	63
IV.5-Surface spécifique Blaine (SSB) des ciments CPJ aux différents ajouts	64
IV.6- Caractérisation des pâtes de ciments confectionnés.....	65
IV.6.1-Consistance normale des pâtes de ciments CPJ élaborés	65
IV.6.2-Expansion des ciments CPJ élaborés	67
IV.7-Propriétés mécaniques desMortiers élaborés	69
IV.7.1-Résistances mécaniques des mortiers CPJ calcaire	69
IV.7.2-Résistances mécaniques des mortiers CPJ déchet céramique	70
IV.8-Conclusion.....	72

Chapitre V : Durabilité des mortiers élaborés

V.1-Introduction	74
V.2-Lessivage du déchet de céramique	74
V.3-Lixiviation des ciments élaborés.....	75

V.4-Durabilité des ciments élaborés dans un milieu acide.....	78
V.4.1-Inspection visuelle de la surface externe des éprouvettes de ciments élaborés immergées dans un milieu acide.....	82
V.5-Durabilité des ciments élaborés dans un milieu naturel.....	82
V.6-Conclusion.....	84
Conclusion générale.....	85
Références bibliographiques.....	87
Annexe : Classification des ciments [NE 197-1 2001].....	98

Liste des figures

Figure	Titre	Page
Figure 1	Production annuelle du ciment aux USA et quelques pays émergents	1
Figure 2	Production annuelle du clinker et du ciment produits par la cimenterie de Saida	2
Figure I.1	Schéma signalétique du procédé de fabrication de la cimenterie de Saida.	7
Figure I.2	Carrière d'argile de la cimenterie de Saïda	7
Figure I.3	Concasseur au niveau de la carrière de calcaire de la cimenterie de Saida	8
Figure I.4	Broyeur du cru de la cimenterie de Saida	8
Figure I.5	Tour de préchauffage de la cimenterie de Saida	9
Figure I.6	Four rotatif de la cimenterie de Saida	10
Figure I.7	Silos de Stockage du clinker de la cimenterie Saida	10
Figure I.8	Broyeur clinker de la cimenterie de Saida	11
Figure I.9	L'expédition par sac et en vrac de la cimenterie de Saïda.	11
Figure I.10	Cliché MEB d'une section polie d'un clinker	13
Figure I.11	Schéma récapitulatif du mécanisme d'hydratation du ciment	15
Figure I.12	Cliché MEB des CSH	16
Figure I.13	Cliché MEB de la Portlandite	16
Figure I.14	Cliché MEB de l'ettringite aciculaire (aiguille)	16
Figure I.15	Clichés MEB de (a) un calcaire naturel et (b) un calcaire de craie	21
Figure I.16	Cliché MEB d'une céramique	22
Figure II.1	Spectromètre fluorescence X type Panalytical ZETIUM	25
Figure II.2	Tamiseur à jet d'air Alpine 200ls	26
Figure II.3	Malaxeur	27
Figure II.4	dépôt du moule sur la plaque de base	28
Figure II.5	appareil Vicat	29

Figure II.6	Schéma explicite illustrant la détermination du temps de prise	30
Figure II.7	prismètre automatique de type Toni	30
Figure II.8	moules à aiguilles Lechatelier	31
Figure II.9	Schéma explicite de la détermination de la stabilité par l'appareil Le chatelier	32
Figure II.10	moule sur la table à chocs	33
Figure II.11	Appareil pour Essais de traction et compression type Toni-technique	35
Figure II.12	Appareil perméabilité de Blaine (Toni PERM)	35
Figure II.13	Démarches de l'essai équivalent sable	38
Figure II.14	Evaluation de la masse volumique apparente	39
Figure II.15	Evaluation de la masse volumique absolue par le pycnomètre	40
Figure II.16	Matériel utilisé dans l'analyse granulométrique	41
Figure II.17	Détermination de l'absorption de l'eau	42
Figure II.18	Procédure de réalisation de l'essai au bleu de méthylène	43
Figure III.1	Morceaux de calcaire provenant de la cimenterie de Saida	46
Figure III.2	Morceaux d'Argile provenant de la cimenterie de Saida	48
Figure III.3	Evolution du taux des alcalis et de la Magnésie dans l'argile exploitée par la cimenterie de Saida au cours de la dernière décennie	49
Figure III.4	Morceaux de Minerai de Fer provenant de la cimenterie de Saida	50
Figure III.5	Sable utilisé par la cimenterie de Saida	51
Figure III.6	courbe granulométrique du sable de correction	52
Figure III.7	Clinker produit par la cimenterie de Saida	54
Figure III.8	Gypse utilisé par la cimenterie de Saida	56
Figure III.9	déchets de céramique collectés	57
Figure III.10	déchet de céramique concassé	57
Figure IV.1	Evolution du rapport E/C en fonction du taux d'ajout des différentes additions cimentaires	66

Figure IV.2	Evolution du temps de prise en fonction du taux d'ajout des différentes additions cimentaires	68
Figure IV.3	Résistances mécaniques des ciments CPJ calcaire aux différentes échéances	70
Figure IV.4	Résistances mécaniques des ciments CPJ déchet céramique aux différentes échéances	71
Figure V.1	Evolution de la conductivité et du pH du milieu d'immersion du déchet céramique en fonction de l'échéance du lessivage.	75
Figure V.2	Eprouvettes des ciments élaborés après 27j d'immersion dans l'eau	76
Figure V.3	Evolution de la conductivité du milieu d'immersion des ciments élaborés en fonction de l'échéance du lessivage	77
Figure V.4	Evolution du pH du milieu d'immersion des ciments élaborés en fonction de l'échéance du lessivage	78
Figure V.5	Eprouvettes CPJ dans l'eau saturée en chaux après 27 jours d'immersion	79
Figure V.6	Eprouvettes après 27j d'immersion dans la solution de chaux saturée	79
Figure V.7	Apparence du milieu acide après 15 mn d'immersion des éprouvettes	80
Figure V.8	Evolution de la perte de masse des éprouvettes des ciments élaborés au cours des différentes échéances d'immersion dans le milieu acide	81
Figure V.9	Aspect visuel des éprouvettes des différents ciments élaborés immergées dans un milieu acide	82
Figure V.10	Immersion des mortiers des différents ciments élaborés dans l'eau de robinet	83

Liste des tableaux

Tableau	Titre	Page
Tableau I.1	Composition chimique moyenne du clinker de ciment industriel	12
Tableau I.2	Composition minéralogique du clinker.	12
Tableau I.3	Principaux hydrates d'une pâte de ciment.	14
Tableau I.4	Classification des ajouts selon leur réactivité.	18
Tableau III.1	Désignation du Ciment produit par la cimenterie de Saida	45
Tableau III.2	Composition chimique du calcaire exploité par la cimenterie de Saida	46
Tableau III.3	Composition chimique du calcaire exploité par différentes cimenteries algériennes	47
Tableau III.4	Composition chimique de l'argile exploitée par la cimenterie de Saida	48
Tableau III.5	Composition chimique de l'argile exploitée par la cimenterie de Saida au cours de la dernière décennie	49
Tableau III.6	Composition chimique du minerai de Fer (SOMIFER).	50
Tableau III.7	Composition chimique du sable (OR-BAT).	51
Tableau III.8	Analyse granulométrique du sable	52
Tableau III.9	Caractéristiques physiques du correcteur : sable	53
Tableau III.10	Dosage des constituants de la farine crue utilisée dans la production du cli	53
Tableau III.11	composition chimique du cru	53
Tableau III.12	Modules de saturation du cru utilisé	53
Tableau III.13	Composition chimique du clinker produit par la cimenterie de Saida	54
Tableau III.14	Composition minéralogique du clinker produit par la cimenterie de Saida	55
Tableau III.15	modules chimiques de saturation du clinker	55
Tableau III.16	Composition chimique du gypse	56
Tableau III.17	Composition chimique des ajouts	58
Tableau III.18	Module de basicité des additions cimentaires utilisées	58

Tableau III.19	Valeurs au bleu de méthylène M_B des ajouts cimentiers utilisés	59
Tableau III.20	Taux d'humidité des ajouts utilisés	59
Tableau III.21	Taux d'Absorption d'eau des additions cimentaires utilisées	59
Tableau III.22	masse volumique des constituants du ciment élaboré	60
Tableau IV.1	Formulation des ciments confectionnés	61
Tableau IV.2	Granulométrie des constituants du ciment CPJ	62
Tableau IV.3	Dosage effectué pour la conception des CPJ étudiés	62
Tableau IV.4	Composition chimique des CPJ confectionnés	63
Tableau IV.5	Granulométrie des ciments CPJ confectionnés	64
Tableau IV.6	Surface spécifique Blaine (SSB) des ciments CPJ élaborés	65
Tableau IV.7	Consistance normale des ciments CPJ élaborés	66
Tableau IV.8	Expansion des ciments CPJ avec ajout calcaire	67
Tableau IV.9	Temps de prise des ciments CPJ avec ajout calcaire	68
Tableau IV.10	Temps de prise des ciments CPJ avec ajout céramique	68
Tableau IV.11	Résistances mécaniques des ciments CPJ avec ajout calcaire	69
Tableau IV.12	Résistances mécaniques des ciments CPJ avec ajout céramique	71
Tableau IV.13	Résistances mécaniques des ciments CPJ produits par la SCIS Saida au cours de dernière décennie	73
Tableau V.1	Evolution de la conductivité et du pH du milieu d'immersion au cours de la période de lessivage du déchet céramique	74
Tableau V.2	Evolution de la conductivité et du pH du milieu d'immersion des ciments élaborés en fonction de l'échéance du lessivage	76
Tableau V.3	Evolution du pH du milieu d'immersion des ciments élaborés en fonction de l'échéance du lessivage.	77
Tableau V.4	Evolution de la masse des mortiers au cours des différentes échéances dans le milieu acide	80
Tableau V.5	Evolution des dimensions des mortiers de ciments élaborés immergés dans un milieu naturel pendant 27j.	83

Liste des abréviations et symboles

CPA : Ciment Portland artificiel.

CP : Ciment portland.

MEB : microscopie électronique à balayage.

E/C : Eau/Ciment.

PAF : Perte Au Feu.

C/A : $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$

ES : Équivalent sable.

M_B : la valeur au bleu de méthylène.

Ab : Le taux d'absorption d'eau.

EN : Norme Européenne.

HM : Module hydraulique

MS : Module silicique

MAF : Module alumino-ferique

LSF : Facteur de saturation en chaux

P_{ab} : masse volumique.

SSB : surface spécifique de Blaine.

XRF : spectrométrie par fluorescence des rayons-X.

NA : Norme algériennes.

PE : perte de masse.

SCIS : Société des Ciments Saïda.

CPJ : Ciment Portland avec aJout.

Notation cimentière

A : Al_2O_3 .

F : Fe_2O_3 .

C : CaO .

N : Na_2O .

H : H_2O .

S : SiO_2 .

K : K_2O .

C₂S : Silicate bicalcique.

C₃S : Silicate tricalcique.

C₃A : Aluminate tricalcique.

C₄AF : Alumino-ferrite tétracalcique.

AFM : $\text{C}_3\text{A}_3\text{CSH}_{32}$.

AFT : $\text{C}_3\text{ACSH}_{12}$.

I

NTRODUCTION

GENERALE

Introduction générale

L'industrie du ciment occupe une place prépondérante dans l'économie de toute nation .C'est un élément nécessaire pour la réalisation des projets de construction dans les domaines industriels, économiques et sociaux [1]. En effet, La production du ciment est au cœur de l'industrie de la construction. Elle est un indicateur économique, lié d'une part au nombre d'habitants, et d'autre part à la croissance de chaque pays sur une période donnée [2].

Par conséquent, la production mondiale du ciment est le baromètre de l'économie internationale. Selon les dernières statistiques que nous avons récoltées [3-6] (figure1), aux Etats Unis d'Amérique, l'ascension du secteur cimentier est croissante au fil des années. La quantité de ciment produite en 2021, avoisine 90 millions de tonnes malgré la période pandémique [6].

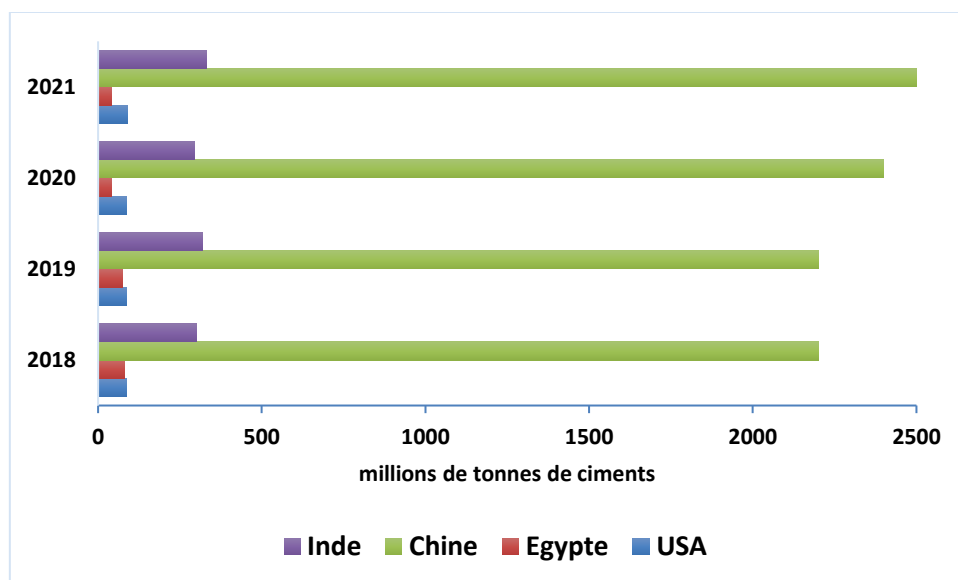


Figure 1 : Production annuelle du ciment aux USA et quelques pays émergents.

Par contre les géants asiatiques dépassent de loin les estimations américaines avec une quantité de 2500millions de tonnes en 2021 produite par la Chine [7]. Dans le continent africain, l'Egypte est mise en avant par son taux de production évalué à 40millions de tonnes l'année passée [7].

En Algérie, La production du ciment est passée de 22 millions de tonnes en 2017 à plus de 40 millions de tonnes cette année [8]. Par sa production actuelle, le pays vise l'exportation aux pays africains. Il faut savoir que plus d'un million de tonnes d'exportation de clinker a été réalisée en 2020 à destination de plusieurs marchés internationaux. [8]

Parmi les cimenteries implantées dans le pays, nous nous sommes intéressées aux produits de la cimenterie de Saida.

Il faut savoir que La Wilaya de Saida située sur les hauts plateaux, connue par son climat semi-aride, se distingue de point de vue géologique par une formation argileuse dominante appelée « Argiles de Saida »[9]. Le territoire de la wilaya de Saida est constitué essentiellement de terrains secondaires ; généralement de couches calcaires, marneuses ou dolomitiques [10].

Ces conditions géologiques confèrent à cette région une matière première non négligeable pour le domaine de la céramique et des liants.

La cimenterie SCIS Saïda est affiliée au groupe GICA mise en marche en 1979 avec une capacité de production annuelle de 500000 tonnes/an. On y produit du ciment portland artificiel (CPA) et un ciment portland aux ajouts (CPJ CEM II/A 42,5). Selon les données rapportées de la cimenterie de Saida (figure2), la production du ciment a vu une baisse ces dernières années vu la concurrence ardue dans le marché national, l'ouverture de plusieurs cimenteries sur le territoire national, mais surtout à cause du ralentissement de la cadence du domaine de construction vu la période pandémique.

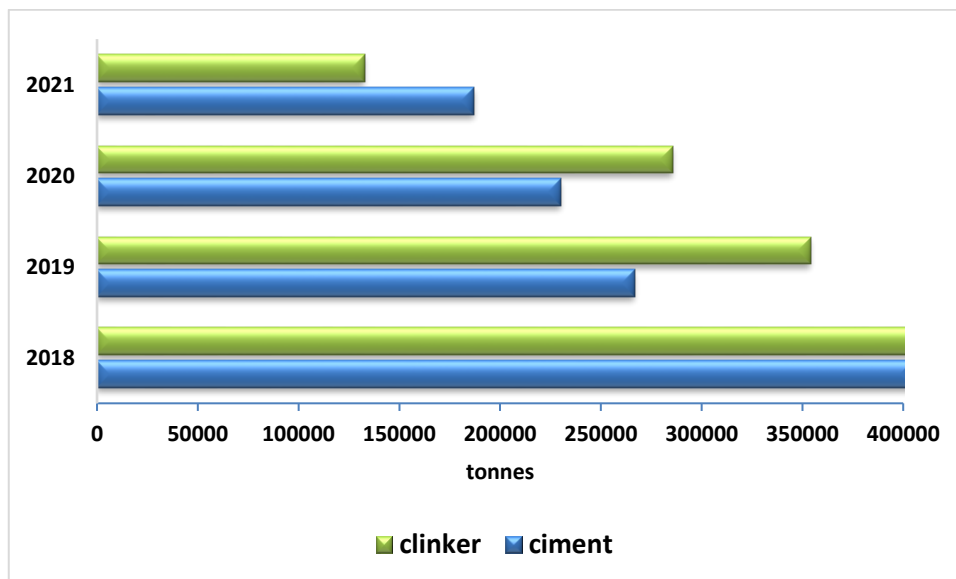


Figure 2: Production annuelle du clinker et du ciment produits par la cimenterie de Saida.

Afin d'être compétitif dans le domaine cimentier, il faut bien viser la gamme de compositions, de résistances, de vitesse de prise et de durcissement des ciments qui répondent aux usages très divers du béton sur chantier ou en usine. Exigences climatiques, résistances à des agents agressifs, autant de paramètres qui impliquent de choisir le ciment le plus approprié. [11]

La dynamique des réactions des ciments va dépendre de nombreux facteurs tels que la finesse de ciment, composition et surtout l'ajout d'éléments secondaires. [12]

Introduction générale

L'objectif de notre travail est de contribuer à l'étude des caractéristiques physico- chimiques et mécaniques du ciment fabriqué au sein de la cimenterie de Saïda en fonction des ajouts cimentaires. Nous avons utilisé comme ajout le calcaire qui n'est autre que le filler utilisé actuellement par la cimenterie en premier lieu et un rebus du bâtiment, un agrégat céramique que nous pouvons collecter dans les débris de démolition , les chantiers de construction ou les unités de production de céramique. Les produits obtenus présentant les meilleures résistances mécaniques ont été par la suite exposés à des milieux aqueux modérés et agressifs afin d'étudier la durabilité de ces liants.

En réponse à ces objectifs tracés, nous avons structuré notre mémoire en trois parties :

La première partie de ce travail englobe un aperçu général sur la technologie des ciments.

La deuxième partie est consacrée aux matériels et méthodes utilisés pour mener à bien notre projet.

La dernière partie présente en premier, la caractérisation du cru cimentier et l'étude des propriétés physico- chimiques des ciments produits par la cimenterie en fonction du taux des différents ajouts choisis : le calcaire ainsi que l'ajout déchet céramique. En deuxième volet, les résultats de la durabilité des produits optimisés sont exposés.

Enfin nous clôturons ce travail par une conclusion générale qui englobe les résultats phares de cette étude.

CHAPITRE I

T **ECHNOLOGIE** **DU CIMENT**

I.1-Introduction:

Le Ciment bien que c'est un matériau centenaire, n'empêche il reste le matériau du 20ème siècle. Composant majeur dans la composition du béton, c'est un élément essentiel dans la construction. Ce matériau joue le rôle de liant au contact de l'eau, d'où son appellation liant hydraulique.

Dans cette première partie du mémoire, nous exposons quelques notions et définitions générales sur le matériau ciment, sa composition chimique et minéralogique et les différentes additions cimentaires utilisées.

Les différentes étapes de fabrication du ciment dans la cimenterie de Saida, depuis la préparation des matières premières jusqu'à l'obtention du produit final (le Ciment) sont énumérées. Le processus d'hydratation du ciment est aussi détaillé dans ce chapitre.

I.2-Le ciment:

Le ciment, liant hydraulique est une matière inorganique finement moulue qui, gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit [13].

Ce durcissement hydraulique est principalement dû à la formation d'hydrates de silicates de calcium sous l'effet de la réaction entre l'eau du mélange et les constituants du ciment.

La production du ciment est régie par un dosage précis de constituants majeurs dans sa composition.

I.3-Constituants du ciment :

Le ciment est constitué d'un mélange broyé de :

- **clinker** constituant principal du liant hydraulique,
- **gypse** matériau secondaire dans la conception du ciment et
- **ajouts cimentiers** afin d'optimiser sa production ainsi que ses différentes propriétés.

Les matières premières qui rentrent dans la fabrication du Ciment sont essentiellement toutes matières renfermant de la chaux (CaO), de la silice (SiO_2), de l'alumine (Al_2O_3) et de l'oxyde ferrique (Fe_2O_3). [14]

Le mélange broyé finement de ces matières premières appelé « cru », selon leurs ressources naturelles disponibles, peut être déficitaire en un oxyde pour répondre à la composition du

clinker visé. Dans ce cas, le cimentier fait appel à des matériaux de correction afin d'ajuster ce déficit.

Le minerai de fer est utilisé afin d'ajuster le dosage de l'oxyde de Fer. Par contre la Bauxite ajuste le déficit en Alumine. Le sable est utilisé pour combler le déficit en Silice.

La préparation du cru consiste à mélanger de manière homogène du calcaire (80%) et des minéraux riches en silice et alumine (20%) : l'argile ou le kaolin. Le cru est ensuite calciné à 1450°C pour former le clinker.

I.4-Paramètres d'optimisation du cru cimentier :

Le dosage de chaque constituant dans le cru est obtenu en respectant des critères permettant de produire un clinker de composition chimique visée. Ces critères sont exprimés en équations liant la composition chimique d'un cru à la composition minéralogique de son clinker. Ces critères sont appelées « modules ». Nous citons dans ce qui suit les principaux modules utilisés par l'industrie cimentière.

I.4.1-LSF (Facteur de Saturation en chaux):

Paramètre permettant de déterminer la teneur optimale en chaux d'un cru pour obtenir la quantité souhaitée en silicates, et plus particulièrement en C_3S . Le clinker devra au final contenir un taux de chaux libre faible inférieur à 1% massique. De manière générale, le facteur de saturation en chaux n'est jamais égal à 1 mais plutôt compris entre 0,95 et 0,97 [15].

$$LSF = \frac{CaO}{2,8SiO_2 + 1,1Al_2O_3 + 0,7Fe_2O_3} \dots\dots\dots (I.1)$$

En présence de MgO, l'expression du facteur LSF change. En effet MgO peut se substituer, dans ces conditions, à une partie du CaO qui peut atteindre jusqu'à 2% massique [15].

Le facteur de saturation en chaux s'écrit alors de la manière suivante :

$$LSF = \frac{CaO + 0,75MgO}{2,8SiO_2 + 1,1Al_2O_3 + 0,7Fe_2O_3} \dots\dots\dots (I.2)$$

I.4.2-MS (Module silicique) :

Exprimé en rapport entre la teneur en SiO_2 et les teneurs en Al_2O_3 et Fe_2O_3 . Ce module prend en compte la réactivité des constituants lors de la clinkérisation. Le module silicique est compris entre 2 et 4 pour un ciment Portland [15].

$$MS = \frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3} \dots\dots\dots (\text{I.3})$$

I.4.3-MF (Module Fer):

Ce paramètre contrôle essentiellement la viscosité de la phase liquide ainsi que la vitesse de formation des C_3A jusqu'à la température de 1338°C .

Le module alumino-ferrique est compris entre 1,5 et 2,5 pour un ciment Portland [15].

$$MF = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Fe}_2\text{O}_3} \dots\dots\dots (\text{I.4})$$

I.4.4-HM(Module hydratation) :

Exprimé en rapport entre la chaux et les teneurs en silicates, aluminates et les oxydes de fer. Le module hydraulique varie entre 1,7 et 2,3 pour un ciment Portland [15]

$$HM = \frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3} \dots\dots\dots (\text{I.5})$$

I.5- Procédé de fabrication du ciment adopté par la cimenterie de Saida :

Le ciment est produit à partir d'un mélange homogène de matières premières, finement broyé appelé farine crue ou simplement cru. Ce dernier est cuit en étant acheminé dans un processus industriel de fabrication afin d'obtenir un produit fini appelé clinker, constituant principal du ciment. Des ajouts sont mélangés au clinker. Le mélange clinker –ajouts, est moulu afin d'obtenir différentes classes de ciment selon des caractéristiques bien définies. Le bon déroulement de cette industrie cimentière dépend des ressources naturelles qui l'alimentent situées à proximité.

Nous déroulons dans ce qui suit le processus de fabrication du ciment dans la cimenterie de Saida (figure I.1) sujet de notre étude pratique.

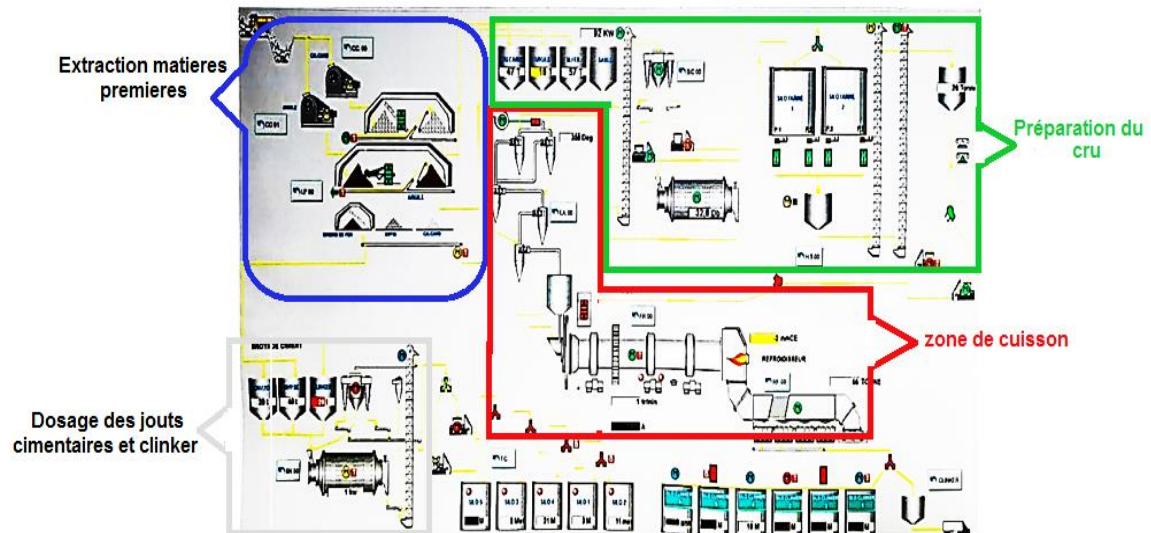


Figure I.1 : Schéma signalétique du procédé de fabrication de la cimenterie de Saïda.

I.5.1-Extraction des matières premières :

Les matières premières sont extraites des parois rocheuses d'une carrière à cielouvert (figure I.2) par abattage à l'explosif ou à la pelle mécanique ou encore par ripage aux bulldozers. La roche est reprise par dumpers vers un atelier de concassage.



Figure I.2 : Carrière d'argile de la cimenterie de Saïda.

I.5.2-Concassage :

Les matières sont concassées en carrière (figureI.3) au débit de 600Tonnes/H (nominal)-700 Tonnes/H maximal pour réduire la granulométrie à 40mm.



Figure I.3 : Concasseur au niveau de la carrière de calcaire de la cimenterie de Saida

I.5.3-Broyage du cru :

Le broyage et le séchage du cru sont réalisés à un débit de 150 Tonnes/H à 160Tonnes/H. dans un broyeur à sortie centrale de 4,10m de diamètre et de 10,5 m de longueur (figureI.4), avec un compartiment de séchage et deux compartiments de broyage.

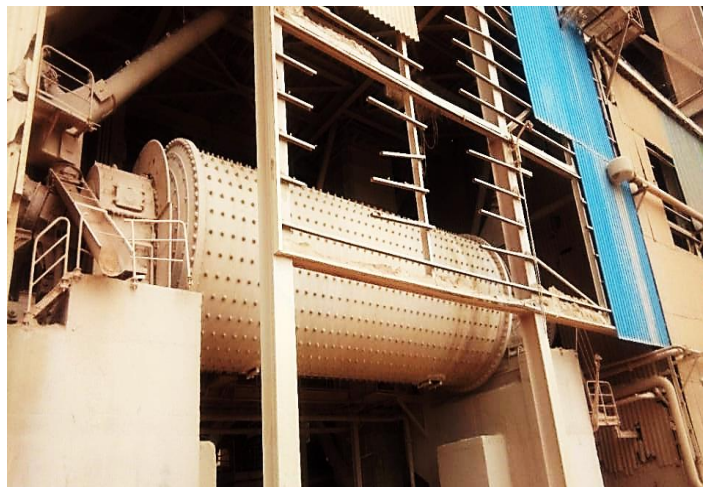


Figure I.4 : Broyeur du cru de la cimenterie de Saida.

I.5.4- Homogénéisation :

La farine crue est homogénéisée dans des halls de pré- homogénéisation, en continu au moyen de silos, à cône central de mélange, d'une capacité unitaire de 10000Tonnes. Pour accroître l'efficacité de l'homogénéisation, ces silos sont alimentés et soutirés simultanément.

I.5.5-Zone de cuisson :

La ligne de cuisson est constituée de:

I.5.5.1-Préchauffeur :

Les gaz réchauffent la poudre crue qui circule dans les cyclones entreposés sur quatre niveaux superposés. Cette installation est appelée « tour de préchauffage » (figure I.5). La circulation des gaz est en sens inverse de la poudre, par gravité. La poudre s'échauffe ainsi jusqu'à 800°C environ et perd donc son gaz carbonique (CO_2) et son eau.

Le préchauffage à contre-courant, est destiné à préchauffer la farine avant son entrée dans le four, en récupérant la chaleur des gaz sortant du four environ égale à 100°C. Un exhausteur monté sur les cyclones, aspire les gaz de combustions en faisant une tornade qui garantit que tous les grains du cru subit la chaleur des gaz.



Figure I.5: Tour de préchauffage de la cimenterie de Saida.

I.5.5.2- Four rotatif :

La farine crue est introduite dans un four rotatif (figure I.6). Le four est un tube légèrement incliné garni de réfractaires. La farine traverse le four dans le sens de la pente, tandis que la flamme se trouve dans la partie basse du four. Le four tourne et la matière chemine lentement vers la flamme.

A 1000°C, nous avons la formation complète de l'aluminate tricalcique C_3A , la combinaison de la chaux CaO et de la silice SiO_2 pour former le silicate bicalcique C_2S et aussi la chaux liée avec les oxydes d'argile forme les aluminates tetracalciques C_4AF .

De 1300°C à 1450°C, C_3A et C_4AF fondent et forment une phase liquide dans laquelle se passe une réaction entre la chaux et C_2S pour donner le silicate tricalcique C_3S , composant principal du produit obtenu appelé clinker.



Figure I.6:Four rotatif de la cimenterie de Saida.

I.5.5.3- Refroidisseur:

Le clinker sortant du four avec une température de 1450°C, subit un refroidissement brusque pour atteindre une température de 80-100°C au moyen d'un courant d'air frais produit par un refroidisseur à bain d'air.

I.5.6-Stockage et expédition:

La manutention du clinker est réalisée par des transporteurs métalliques vers les six silos de capacité totale de 29000Tonnes (figure I.7). L'extraction du clinker est assurée par des extracteurs vibrants.



Figure I.7 : Silo de Stockage du clinker de la cimenterie Saida.

Le broyage du clinker est réalisé en continu dans des broyeurs (figure I.8) alimentés à partir des stocks de clinker et des différents constituants et ajouts.

Le broyage a pour objectif, d'une part de réduire les granulats de clinker en poudre et d'autre part, de procéder à l'ajout du gypse et des éventuels ajouts cimentaires, ce qui permet d'obtenir les différents types de ciments normalisés (Annexe).



Figure I.8 : Broyeur clinker de la cimenterie de Saïda.

A la sortie du broyeur, le ciment est transporté vers des silos de stockage (05 silos capacité unitaire = 5.000 tonnes) (figure I.9), pour être soit ensaché, soit expédié en vrac. La livraison en vrac est assurée par camions.



Figure I.9 : Expédition par sac et en vrac de la cimenterie de Saïda.

I.6-Le clinker:

Le clinker, produit obtenu après cuisson du cru aux températures élevées (jusqu'à 1450°C), se présente sous forme de granules, de diamètre compris entre 5 et 40mm. Les granules de

Clinker obtenus sont finement co-broyés avec le gypse ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) 3 à 5% en masse[16]. Le gypse est une matière secondaire dont le rôle est de réguler la prise.

I.6.1-Composition chimique du clinker :

Le clinker est principalement composé d'oxydes métalliques, les quatre principaux sont: l'oxyde de calcium (CaO), de silicium(SiO_2), d'aluminium(Al_2O_3)et de fer(Fe_2O_3), qui représentent environ 95%de sa masse. [17]

La composition chimique d'un clinker de ciment Portland industriel est exposée dans le tableau I.1 :

Tableau I.1 : Composition chimique moyenne du clinker de ciment industriel [18]

Composition chimique	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Alcalins
(%)	62-67	19—25	2-9	1-5	0-3	1-3	0,5-1,5

I.6.2-Composition minéralogique moyenne du clinker :

Les quatre phases minéralogiques principales : C_3S , C_2S , C_3A et C_4AF , représentent 90% ou plus de la masse du clinker (Tableau I.2).

Tableau I.2:Composition minéralogique du clinker [19].

Composition minéralogique	Formule	Notation cimentière	Taux (%)
Silicate tricalcique	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_3S	45-65
Silicate bicalcique	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_2S	15-35
Aluminate tricalcique	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	4-14
Aluminoferritetetracalcique	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	10-18

La répartition des phases principales du clinker dans le ciment Portland est en moyenne de 60% C_3S , 15% C_2S , 5,8% C_3A et 8% C_4AF [20]. L'analyse d'une section polie de clinker par microscopie électronique à balayage (MEB) permet de distinguer la morphologie des différentes phases du clinker (figure I.10).Les cristaux de forme polygonale correspondent à l'alite (C_3S), les cristaux de bélite (C_2S) sont de forme arrondie. Enfin, la phase Interstitielle enrobant les grains d'alite et de bélite correspond aux aluminates et ferro-alminates de calcium [21].

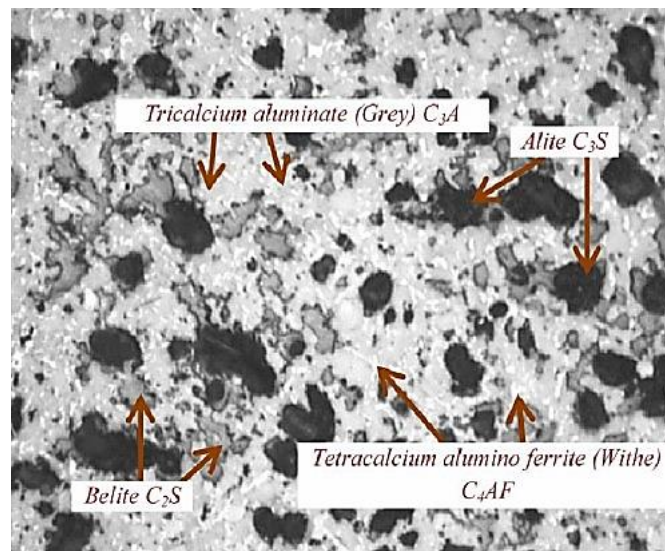


Figure I.10: Cliché MEB d'une section polie d'un clinker [22]

I.6.2.1-Silicate tricalcique - Alite « C_3S » :

Le « C_3S » 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 [23].

I.6.2.2-Silicate bicalcique - Bélite « C_2S »:

Il confère au ciment des résistances moins élevées que le « C_3S » ; mais développe les résistances à long terme. Son aptitude au broyage est moins bonne que celle de « C_3S », car sa dureté est plus grande. Au microscope, il apparaît sous forme de grains arrondis [23].

I.6.2.3-Aluminate tricalcique - Céliste « C_3A » :

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 sulfo aluminates de chaux, l'ettringite souvent très expansif. La réaction d'hydratation est fortement exothermique [23].

I.6.2.4-Aluminate tétra calcique - Féliste « C_4AF »:

Il confère au ciment des résistances faibles et peu précises. On peut dire qu'il est inactif sur le plan hydraulique mais il constitue un fondant pendant la cuisson avec « C_3A » [23].

I.7-Processus d'hydratation:

Le terme "hydratation" désigne l'ensemble des réactions chimiques qui se produisent quand un ciment anhydre se trouve en contact avec l'eau. L'hydratation d'un ciment Portland peut se résumer, dans une approche simplifiée, à l'hydratation des quatre phases majoritaires du clinker : C_3S , C_2S , C_3A et C_4AF [24].

Les principales phases du ciment hydraté sont présentées dans le tableau I.3.

Tableau I.3: Principaux hydrates d'une pâte de ciment Portland.[14, 25]

Phase hydratée	Notation cimentière	Formule chimique
Silicate de Calcium Hydraté	CSH	$1,7CaO \cdot SiO_2 \cdot 2,4H_2O$
Portlandite	CH	$Ca(OH)_2$
Ettringite	$C_6AS_3H_{32}$ (AFt)	$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3(CaO \cdot SO_3) \cdot 32H_2O$
Monosulfo-aluminate	C_4ASH_{12} (AFm)	$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaO \cdot SO_3 \cdot 12H_2O$
Katoïte	C_3AH_6	$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O$

La cinétique d'hydratation se résume comme suit :

L'eau destinée au gâchage des pâtes de ciments doit être propre et ne doit pas contenir d'impuretés qui pourraient nuire à la qualité de la pâte (matières organiques ou chimiques...) [26]. Le ciment portland demande environ 25% de son poids en eau pour s'hydrater complètement [27]. Toute variation de la quantité d'eau entraîne des modifications de la vitesse de durcissement et des performances mécaniques. [28]

Les différentes phases du ciment vont s'hydrater suivant un processus exothermique de dissolution-précipitation pour former un matériau cohésif. [28]

La cinétique d'hydratation du ciment Portland se décompose en quatre phases (Figure I.11).

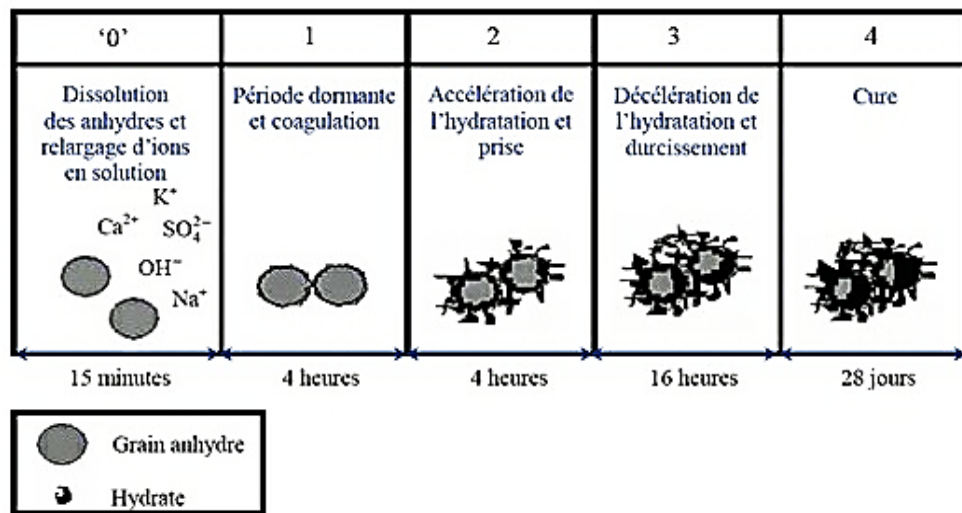
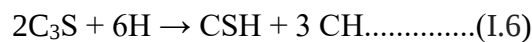


Figure I.11:Schéma récapitulatif du mécanisme d'hydratation du ciment. [29]

Période 0 : réactions initiales

Cette période exothermique débute dès le contact entre l'eau et le ciment, et dure quelques minutes seulement après le malaxage. Le C_3S et le C_3A réagissent immédiatement avec l'eau, formant de l'étringite et des CSH. Cela correspond donc à une phase de dissolution. [30]



Où CH représente le $Ca(OH)_2$ (Portlandite).

Les silicates de calcium hydratés CSH (figure I.12) occupent entre 60 et 70% du volume de solide d'une pâte de ciment complètement hydratée. Ces silicates se présentent en cristaux très petits et mal cristallisés [31].

La Portlandite (figure I.13) occupe entre 20 à 25% du volume des solides de la pâte de ciment complètement hydratée [31]. Cette phase minéralogique a une morphologie hexagonale prismatique [31]. Elle participe peu au développement de la résistance. En fait, la présence de la portlandite peut être un risque, parce qu'elle est fortement soluble et susceptible à l'attaque d'acide et de sulfate. [31]

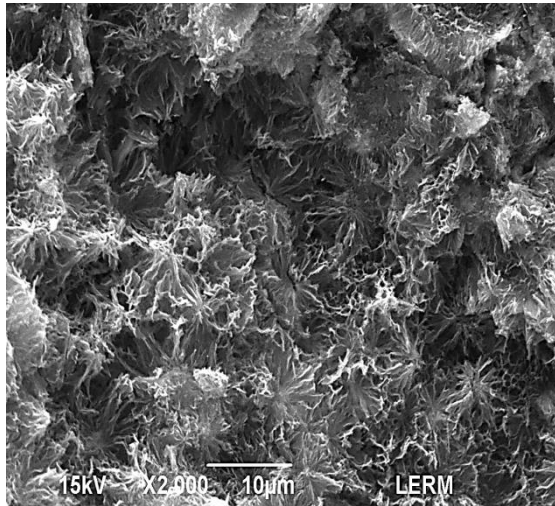


Figure I.12 : Cliché MEB des CSH [32]

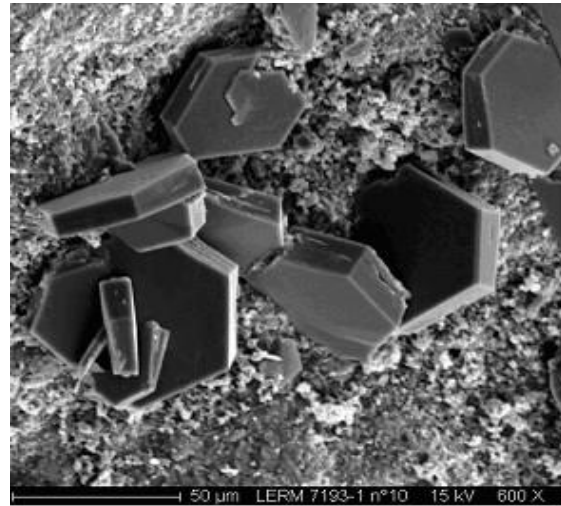


Figure I.13 : Cliché MEB de la Portlandite [32]

L'aluminate tricalcique est le composé du ciment le plus réactif avec l'eau. En effet, l'hydratation des aluminates est très rapide de telle sorte que les cimentiers ajoutent du gypse au clinker pour contrôler ces réactions.

Cette réaction globale d'hydratation de C_3A est donnée comme suit :



Les aluminates réagissent avec le sulfate du gypse pour former de l'ettringite AFt (tri-sulfo-aluminate de calcium hydraté). : $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3(CaO \cdot SO_3) \cdot 32H_2O$ (figure I.14). Cette réaction est fortement exothermique. Une couche d'hydrates vient entourer les aluminates qui forment alors une couche protectrice autour du grain. [33]

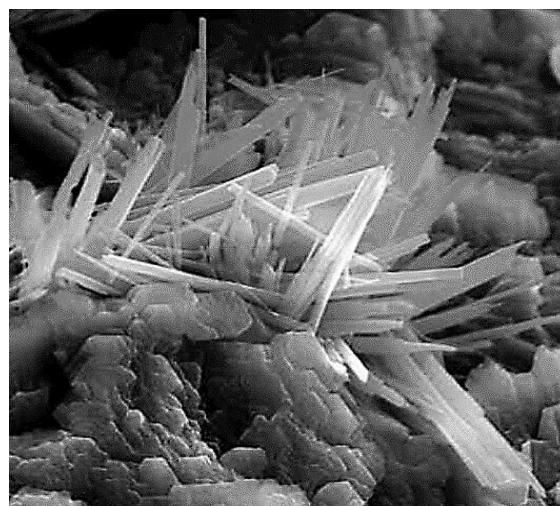


Figure I.14 : Cliché MEB de l'ettringite aciculaire (aiguille)[34]

Lorsque le gypse est épuisé, la concentration en sulfates de la solution baisse. L'ettringite devient alors instable et se dissout pour former du mono-sulfate de calcium hydraté (AFm) : $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO} \cdot \text{SO}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$. Les réactions chimiques s'intensifient. [33]

Période 1 : période dormante

Durant cette période, les ions Ca^{2+} et OH^- sont libérés. Ceci augmente alors le pH de la solution, ralentissant la dissolution des constituants. L'activité chimique et le dégagement de chaleur sont faibles. Graduellement, le revêtement des produits d'hydratation autour des particules de ciment grossit. [30]

Période 2 : période d'accélération

Cette période fortement exothermique débute lorsque la concentration en ions Ca^{2+} et OH^- de la solution devient critique par rapport à la Portlandite [$(\text{Ca}(\text{OH})_2) \approx 36 \text{ mmol/L}$ à 25°C] [35], la conductivité électrique de la solution étant alors à son maximum. Cette sursaturation induit la précipitation de la Portlandite. Il s'ensuit alors les mécanismes de dissolution, de nucléation et de précipitation des différentes phases, permettant la formation des hydrates (ettringite, Portlandite, CSH). La prise du ciment se situe donc dans cette période. Elle correspond au moment où le ciment passe de sa phase liquide à sa phase solide [35].

Période 3 : période de ralentissement

Les grains anhydres se retrouvent recouverts d'une couche d'hydrates qui s'épaissit de plus en plus. Pour que l'hydratation se poursuive, l'eau doit diffuser à travers les pores de gel. Ainsi, cette période se traduit par une diminution de la chaleur dégagée. Si le réseau poreux est fermé, une partie du ciment n'est jamais atteinte et donc ne sera jamais hydratée. De plus la quantité d'eau au départ doit être suffisante pour hydrater tout le ciment. Durant cette période l'ettringite de type AFt se dissout afin de se transformer en monosulfoaluminate de calcium hydraté de type AFm [36].

Le C_3S est presque totalement consommé à 28 jours et permet au ciment d'avoir une résistance élevée. Le C_2S s'hydrate par contre très lentement et confère des résistances élevées à moyen et long terme. [36]



L'hydratation de C_2S produirait 82% de gel de CSH et seulement 18% de CH [14]. Donc une quantité plus élevée de C_2S dans le ciment aurait comme conséquence plus de résistance. Pour

la résistance au jeune âge. Cependant, plus de C_3S est nécessaire, parce que sa vitesse de réaction est plus élevée [14].

Le C_4AF réagit avec le gypse avec un mode semblable que celui de C_3A , mais dans ce cas, la réaction est beaucoup plus lente. Dans la première étape de la réaction, le C_4AF produit une forme élevée de sulfo-aluminate de calcium qui réagit avec l'excès de C_4AF pour donner une basse forme de sulfo-aluminates. Ces sulfo-aluminates occupent environ 15-20% du volume de solides dans la pâte [31]. La réaction du C_4AF dégage peu de chaleur et participe peu au développement de la résistance.

I.8-Ajouts cimentiers (Additions cimentaires) :

Ces matériaux proviennent principalement soit de matériaux naturels, de sous-produits de l'industrie métallurgique ou des centrales thermiques à charbon, et sont classés selon la norme NF EN 197 1 en ajouts minéraux inertes ou actifs [37] (tableau I.4).

Tableau I.4 : Classification des ajouts selon leur réactivité. [38]

Type	Réactivité	Matériaux
Hydraulique	<i>Fortement actif</i>	Ciments spéciaux-chaux hydraulique
Hydraulique Latent		Laitier granule-cendres volantes riches en calcium (calciques)
Pouzzolanique	<i>Fortement actif</i>	Fumée de silice
	<i>Moyennement actif</i>	Cendres volantes pauvres en calcium, pouzzolanes naturelles (verre volcanique, tufs volcaniques, trass phonolithe, terres a diatomées
Inerte	<i>Inerte</i>	Fillers (farine calcaire...)

I.8.1-les ajouts minéraux actifs :

Ce sont des matériaux, naturels ou artificiels, capables de réagir en présence d'eau avec l'hydroxyde de chaux pour donner naissance à des composés nouveaux, stables, peu solubles dans l'eau et possédant des propriétés liantes.[39]

I.8.1.1- La pouzzolane :

La pouzzolane est d'origine volcanique essentiellement composée de silice, d'alumine et d'oxyde de fer. Ce matériau peut être de source naturelle ou artificielle.

I.8.1.2-Pouzzolane artificielle :

C'est une matière essentiellement composée de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques[40]. Les roches traitées thermiquement peuvent être : argiles, schistes, latérite, bauxite.[41]

I.8.1.3-La fumée de silice :

Les fumées de silice sont un sous-produit de la fabrication du silicium ou de différents alliages de ferro-silicium. Les fumées de silice sont produites lors de la réduction d'un quartz très pur par du charbon dans un four à arc, à la température de 2000°C.[40]

I.8.1.4-Laitiers de hauts fourneaux :

Ce sont des sous-produits de fabrication de la fonte. Ils sont formés de constituants non ferreux, de fondants et de cendres de coke. Ils peuvent être utilisés comme granulats dans le béton. Leur composition en oxydes et leur structure vitreuse obtenue par trempe à l'eau leur confèrent des propriétés hydrauliques latentes, ce qui permet d'envisager leur utilisation en tant qu'addition cimentaires.[42]

I.8.1.5-Les cendres volantes siliceuses (V) ou calciques (W) :

Elles sont recueillies dans les centrales thermiques fonctionnant au charbon et sont généralement utilisées pour la finesse de leurs particules, ce qui accroît leur réactivité. Pour qu'une variété de cendres volantes à faible teneur en calcium puisse avoir des propriétés liantes optimales, elle doit avoir un pourcentage de matière non liante inférieure à 5%, une teneur en Fe_2O_3 inférieure ou égale à 10 % et celle en CaO qui doit être très faible.[43]

La teneur en aluminosilicate doit être comprise entre 40-90 % de particules d'un diamètre équivalent inférieur à 45µm. [44]

I.8.2-Les ajouts inertes :

Ce sont des matériaux quasiment inertes, naturels ou synthétiques spécialement sélectionnés et qui par leur composition granulométrique, améliorent les propriétés physiques du ciment Portland : ouvrabilité, pouvoir de rétention d'eau [45]. Parmi ces additifs, on distingue les fillers calcaires.

I.8.2.1- Fillers calcaires :

Les fillers calcaires sont des produits obtenus par broyage fin de roches naturelles (calcaires, basalte, bentonite, etc.) présentant une teneur en carbonate de calcium CaCO_3 supérieure à 75% [44].

Ces produits désignés dans le commerce comme fillers sont des poudres fines à granulométries contrôlées et dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 micron.[46]

Les fillers se différencient les uns des autres par : [47]

- leur origine, leurs compositions chimiques et minéralogiques, leurs défauts de structure, les impuretés qu'ils contiennent.
- leur finesse, la forme des grains, leur état de surface.
- leur dureté, leur porosité.

Un filler est dit calcaire s'il contient au moins 90% de carbonate de calcium. Dans les autres cas, le filler est désigné par le nom de sa roche d'origine. Les différents résultats montrent que les fillers calcaires ajoutés à un CPA peuvent jouer plusieurs rôles :

- Un rôle de remplissage en substitution du ciment dans les éléments fins de la courbe granulométrique (bétons ouvrables retenant mieux l'eau). [48]
- Un rôle rhéologique par leur pouvoir fluidifiant sur la pâte interstitielle.[49]
- Un rôle chimique et physique conduisant à l'accélération de l'hydratation du C_3S et du C_3A et à la formation de carboaluminates : germes de cristallisation et points d'ancrage des hydrates. [50]
- Un rôle physique en permettant un arrangement initial différent ce qui réduit l'épaisseur entre la pâte et le granulat. [46]

La texture du calcaire varie de granuleuse, grossièrement cristalline à très fin, en fonction du processus de formation [34]. Les images au MEB de deux types de calcaire sont présentées

sur la figure I.15. La finesse, en termes de surface spécifique, est généralement comprise entre 350 et 600 m²/kg.[51]

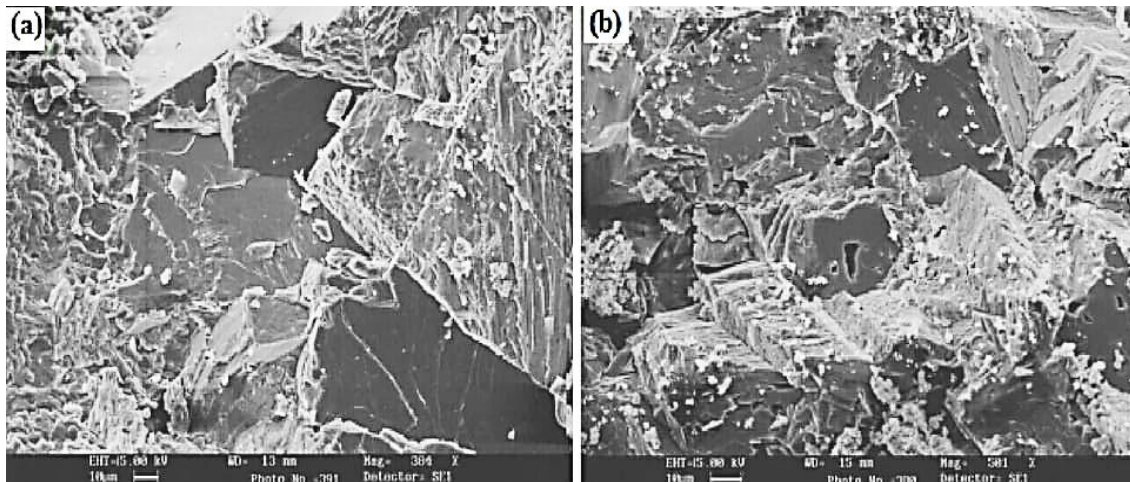


Figure I.15 : Clichés MEB de (a) un calcaire naturel et (b) un calcaire de craie. [51]

I.8.2.2-Les céramiques :

Ce sont des matériaux inorganiques, composés d'oxydes, de carbures, de nitrures et de borures. Les céramiques sont mises en forme à partir d'une poudre de granulométrie adaptée qui est agglomérée. Dans une deuxième étape, la densification et la consolidation de cet agglomérat sont obtenues par un traitement thermique appelé frittage. A la différence des verres, les céramiques (figure I.16), en tous cas dans les matériaux les plus anciens, sont constituées de 2 phases distinctes : une phase vitreuse, la matrice (désordonnée) et une phase cristalline dispersée (ordonnée).[52]

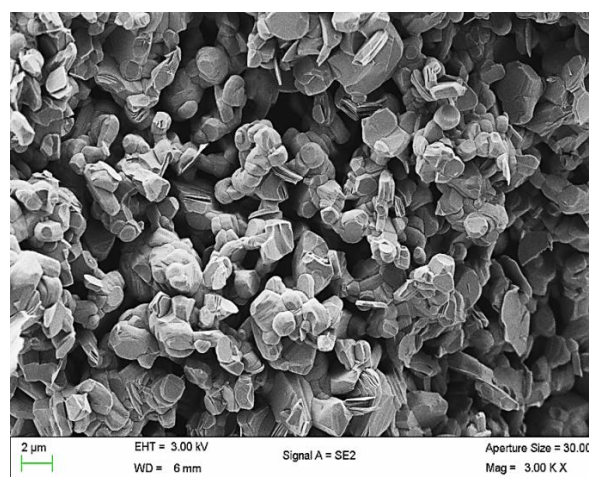


Figure I.16 : Cliché MEB d'une céramique. [53]

Les céramiques sont utilisées dans l'industrie cimentière comme ajout selon les besoins pour plusieurs raisons:

- Les céramiques demeurent solides à température élevée[54].
- Ce sont des produits qui résistent bien aux chocs thermiques ainsi qu'au vieillissement et aux agressions climatiques ou chimiques. [55]
- Les objets en céramique possèdent généralement une bonne résistance mécanique, une faible masse volumique, une dureté élevée et une bonne résistance à l'usure. Elles sont généralement opaques ou translucides (verres amorphes). [55]

I.9- Valorisation des déchets de céramique dans l'industrie cimentière :

Un déchet est tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation [56]. Il est défini comme inerte, selon la directive européenne 1999/31/CE du 26 avril 1999 [57], relative à la mise en décharge "s'il ne subit aucune modification physique, chimique ou biologique importante". Ces déchets inertes sont donc essentiellement des déchets minéraux ou assimilables au substrat naturel et non pollués. Ce sont les bétons, tuiles et céramiques, briques, déchets de verre, terres et granulats non pollués, les laines de verre, de Roche, de laitier, verre expansé, etc. Le chantier de construction est donc une source importante de matières premières [58].

L'utilisation de déchets de céramique et leur valorisation dans l'industrie cimentière a amélioré les propriétés des ciments produits. Par exemple, selon Awoyera et al [59], la résistance mécanique des ciments augmente lorsque nous substituons de plus en plus le ciment portland par des agrégats de céramique de finesse 5–10 mm

Hemanth et al [60] ont démontré que l'utilisation des déchets de céramique peut résoudre des problèmes de pénurie d'agrégats dans diverses constructions des sites. En outre, cela peut réduire les problèmes environnementaux liés à l'extraction globale des déchets en général et en particulier les déchets céramiques.

Cependant, la plupart des études effectuées [61] démontrent bien qu'il y a un gain de résistance. La même constatation a été démontrée par Fernando Pacheco-Torgal et Jalali [62] et a été confirmée par Hemanth et al [60].

Il s'avère donc d'après ce qu'on vient de voir que la valorisation des déchets de céramique apporte un grand intérêt :

- Pour les unités de fabrication de céramique, il leur permet de liquider leurs stocks en déchets et facilite la gestion des espaces de manipulation de ces produits.
- Pour les acteurs de l'environnement, l'élimination des déchets contribue fortement à la préservation des ressources naturelles et à la limitation des risques de pollution liés à ces déchets d'une part et c'est une contribution à l'amélioration de l'hygiène d'autre part.

CHAPITRE II

MATERIELS ET METHODES

II.1-Introduction

Afin d'étudier les propriétés du ciment produit par la cimenterie de Saida, nous devons caractériser les matières premières et les produits finis ainsi que l'évolution du ciment dans différents milieux. Les méthodes d'analyses choisies permettent d'atteindre cet objectif à la fois de déterminer la composition chimique des matériaux utilisés, ainsi que leurs propriétés physiques et mécaniques.

Le présent chapitre englobe les différentes méthodes d'analyse ainsi que les protocoles expérimentaux suivis. La majorité du travail a été effectuée au niveau du laboratoire de contrôle de qualité de la SCI-Saida. Le laboratoire LTPO a été sollicité pour quelques analyses physiques. Les essais de la durabilité et de lixiviation ont été réalisés au niveau du laboratoire génie des procédés de l'université de Saida.

II.2-Analyse spectrale

La détermination de la composition des différents matériaux a été effectuée par dosage spectrométrique.

II.2.1- Analyse par spectrométrie de fluorescence des rayons X :[63]

Cette méthode sert à identifier et à doser tous les éléments chimiques dans leurs combinaisons les plus diverses. L'échantillon à analyser est irradié par des rayons X de haute intensité. De ce fait, les éléments contenus dans la préparation sont excités et émettent un rayonnement de fluorescence spécifique à chacun d'eux par réflexion sur un cristal analyseur.

Ce rayonnement sera décomposé en raies spectrales dont l'intensité mesurée sera le reflet de l'identité et de la concentration des éléments analysés.

Cette analyse a été effectuée au niveau du laboratoire de contrôle de qualité de la cimenterie de Saida au moyen du spectromètre de fluorescence Xtype Panalytical ZETIUM (figure II.1).



Figure II.1: Spectromètre fluorescence X type Panalytical ZETIUM

II.3-Analyses chimiques

II.3.1-Détermination de la chaux libre CaO_L : [64]

La chaux libre représente la chaux non combinée. Par conséquent, c'est le taux de chaux qui n'entre pas en réaction lors de la cuisson avec les oxydes présents dans la farine crue.

Ce taux ne doit pas excéder 2,4% car la présence d'une quantité élevée provoque l'expansion du ciment.

La chaux libre dans le ciment ou le clinker se dose par titrage à l'ébullition dans un solvant (mélange anhydre glycérine et alcool) au moyen d'une solution alcoolique titrée d'acétate d'ammonium.

Procédure

On pèse 0,5g du clinker finement broyé. On y ajoute 25ml de solvant et quelques gouttes de phénol phtaléine. On ferme l'Erlen Meyer avec un bouchon traversé par un tube de verre taillé en biseau à la base, pour condenser la plus grande partie de l'alcool. Puis on chauffe sur bain de sable jusqu'à apparition de couleur rose.

On dose ensuite par l'acétate d'ammonium jusqu'à disparition de cette couleur.

On poursuit l'alternance de ces opérations (ébullition et addition d'acétate d'ammonium) jusqu'à ce que la coloration rose ne réapparaisse plus après un quart d'heure de chauffage.

On obtient le taux de chaux libre par:

$$\%CaO_L = V \left(\frac{\text{Titre}_{d'acétate}}{\text{masse}_{clinker}} \right) \times 100 \dots\dots (II.1)$$

Où:

Titre _{d'acétate}: Titre d'acétate d'ammonium par rapport à une solution étalon de CaCO₃.

Masse _{clinker} : prise d'essai (g).

V : volume de la solution titrée (ml).

II.4-Analyses physiques

Les propriétés physiques des différents matériaux utilisés ont été déterminées selon les normes en vigueur.

II.4.1-Détermination de la finesse des ciments :[65]

La finesse des ciments est déterminée par tamisage au moyen de tamis d'ouverture 40µm et 90µm en pesant le refus.

Procédure

100 g de ciment sont introduites dans un tamiseur à jet d'air de type Alpine. Deux tamis d'ouverture 40 µm et 90 µm ont été utilisés. Au niveau du laboratoire de contrôle de qualité de la cimenterie de Saida, on utilise le tamiseur à jet d'air Alpine type 200ls (figure II.2).



FigureII.2: Tamiseur à jet d'air Alpine type 200ls.

II.4.2-Détermination de la consistance normalisée : [66]

La pâte de ciment de consistance normalisée a une résistance spécifiée à la pénétration d'une sonde normalisée. L'eau nécessaire à une telle pâte est déterminée par des essais de pénétration sur pâte à quantité d'eau différente.

Protocole

On met dans un malaxeur (figure II.3) 150ml d'eau. On y ajoute 500g de ciment. On note la fin de cette opération comme temps zéro. On met le malaxeur en service immédiatement à vitesse lente pendant 90s. On arrête la machine pendant 15s pour gratter les parois du malaxeur avec un instrument convenable.



Figure II.3 : Malaxeur.

Le temps total de fonctionnement du malaxeur doit être de 3min. La pâte obtenue est introduite immédiatement dans le moule. On enlève l'excès de la pâte par un mouvement de va-et-vient effectué avec précaution, de manière à laisser la pâte remplir le moule avec une surface supérieure lisse.

On règle l'appareille de Vicat (figure II.5) muni au préalable de la sonde par abaissement de celle-ci jusqu'à la plaque de base et par ajustement du repère au zéro de l'échelle, et on relève la sonde en position d'attente.

On place le moule (figure II.4) sur la plaque de base aussitôt après arasement de la pâte dans l'axe de la sonde de l'appareil Vicat.



Figure II.4 : dépôt du moule sur la plaque de base.

On abaisse la sonde avec précaution jusqu'à ce qu'elle arrive au contact de la pâte.

On lâche alors rapidement les parties mobiles et on laisse la sonde pénétrer verticalement au centre de la pâte. La libération de la sonde doit avoir lieu 4min après l'instant zéro. On effectue la lecture de l'échelle à la fin de la pénétration ou 30s après la libération de la sonde, selon que l'une ou l'autre de ces deux limites de temps se présente la première.

On enregistre la lecture de l'échelle, qui indique la distance entre la face inférieure de la sonde et la plaque de base. La sonde est immédiatement nettoyée après chaque pénétration.

On répète l'essai avec des pâtes ayant des teneurs en eau différentes jusqu'à ce qu'il s'en trouve une donnant une distance de $(6 \pm 3 \text{ mm})$ entre la sonde et la plaque de base.

On enregistre la teneur en eau de cette pâte E/C exprimée à 0,5% près comme teneur en eau pour l'obtention de la consistance normalisée.

$$E / C = \left(\frac{\text{Volume.d'eau}}{500} \right) \times 100 \dots\dots\dots(\text{II.2})$$

Où

E :volume d'eau

C :quantité de ciment

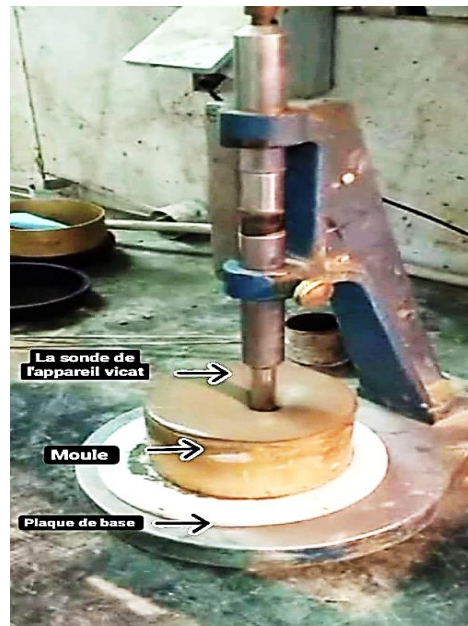


Figure II.5: appareil Vicat.

II.4.3-Détermination du temps de prise :[66]

Le temps de prise est déterminé par l'observation de la pénétration de l'aiguille de Vicat dans une pâte de ciment de consistance normalisée jusqu'au moment où elle atteint une valeur spécifiée.

II.4.3.1- Détermination du temps de début de prise :

On règle l'appareil Vicat muni au préalable de l'aiguille jusqu'à la plaque de base et par ajustement du repère au zéro de l'échelle.

On remplit un moule Vicat de pâte consistante, et on place le moule rempli ainsi que sa plaque de base au-dessous de l'aiguille de l'appareil Vicat et on abaisse l'aiguille avec précaution jusqu'à ce qu'elle arrive au contact de la pâte. On lâche rapidement les parties mobiles et on laisse l'aiguille pénétrer verticalement dans la pâte. On effectue la lecture de l'échelle à la fin de la pénétration ou 30s après la libération de l'aiguille, selon que l'une ou l'autre de ces deux limites de temps se présente la première.

On enregistre la lecture de l'échelle, qui indique la distance entre l'extrémité de l'aiguille et la plaque de base.

On répète l'essai de pénétration sur la même éprouvette à des positions convenablement espacées, à plus de 10 mm du bord du moule, ou l'une de l'autre.

On enregistre le temps de mesure depuis l'instant zéro, au bout duquel la distance entre l'aiguille et la plaque de base est de (6 ± 3) mm comme temps de début de prise du ciment.

II.4.3.2- Détermination du temps de fin de prise :

On retourne le moule rempli utilisé sur sa plaque de base de façon que les essais de fin de prise soient faits sur la face de l'éprouvette primitivement en contact avec la plaque de base. On enregistre, à 15min près, le temps mesuré depuis l'instant zéro, au bout duquel l'aiguille ne pénètre pour la première fois qu'à 0,5 mm dans l'éprouvette comme temps de fin de prise du ciment.

La détermination du temps de prise est illustrée sur la figure II.6.

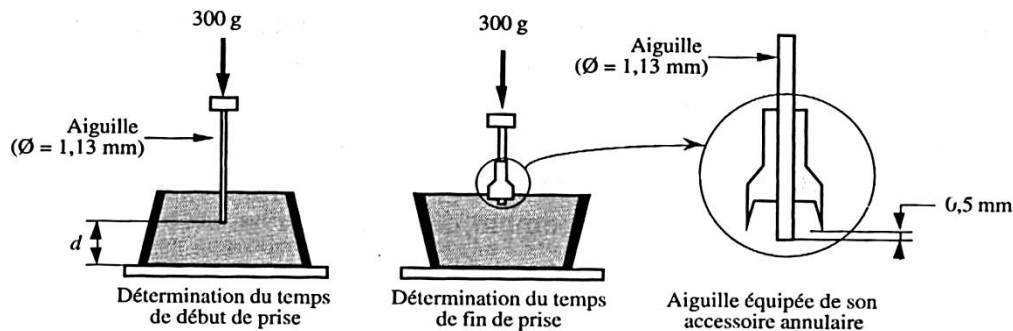


Figure II.6: Schéma explicite illustrant la détermination du temps de prise[67]

Ces opérations sont réalisées à l'aide d'un prisomètre automatique (figure II.7).



FigureII.7 :Prisomètre automatique type Toni

II.4.4- Détermination de la consistance normalisée : [66]

Le but principal de l'essai de stabilité est d'apprécier le risque possible d'expansion tardive due à l'hydratation des oxydes de calcium et ou de magnésium libres. La norme impose pour tous les ciments une stabilité $\geq 10\text{mm}$. La stabilité est déterminée par l'observation de

l'expansion volumique d'une pâte de ciment de consistance normalisée, révélée par un mouvement relatif de deux aiguilles.

Protocole

On effectue l'essai simultanément de deux éprouvettes de la même gâchée de pâte de ciment préparé pour la consistance normalisée. On place un moule Lechatelier (figure II.8) légèrement huilé sur la plaque inférieure et on le remplit immédiatement sans tassement ni vibration excessifs, uniquement à la main et à l'aide d'un outil pour araser la surface supérieure. On couvre le moule de la plaque supérieure légèrement huilée, munie du poids supplémentaire si nécessaire. On place alors immédiatement l'appareil complet dans l'armoire humide où on l'y maintient pendant $(24 \pm 0,5)$ h à (20 ± 2) °C et à au moins 98% d'humidité relative.

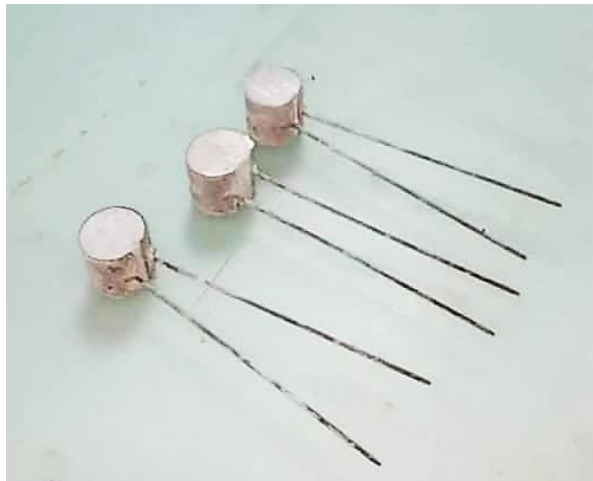


Figure II.8 : moules à aiguilles Lechatelier.

Au bout de cette durée, on mesure à 0,5 mm près l'écartement A entre les pointes des aiguilles (figure II.9). Puis on chauffe alors graduellement le moule jusqu'à ébullition entre (30 ± 5) min et on maintient le bain d'eau à la température d'ébullition pendant $3h \pm 5$ min.

Au bout de la période d'ébullition, l'écartement B (figure II.9).entre les pointes des aiguilles peut être mesuré à 0,5 mm près. Ensuite, on laisse refroidir le moule jusqu'à (20 ± 2) °C et on mesure à 0,5 mm près la distance C (figure II.9).entre les pointes des aiguilles. Enfin on enregistre pour chaque éprouvette les mesures A et C et on calcule la différence $C - A$.

La stabilité est donnée par :

$$\text{stabilité}(mm) = MC - MA \dots \dots \dots (II.3)$$

Où :

MC : mesure après refroidissement jusqu'à 20°C

MA : mesure après 24h de conservation

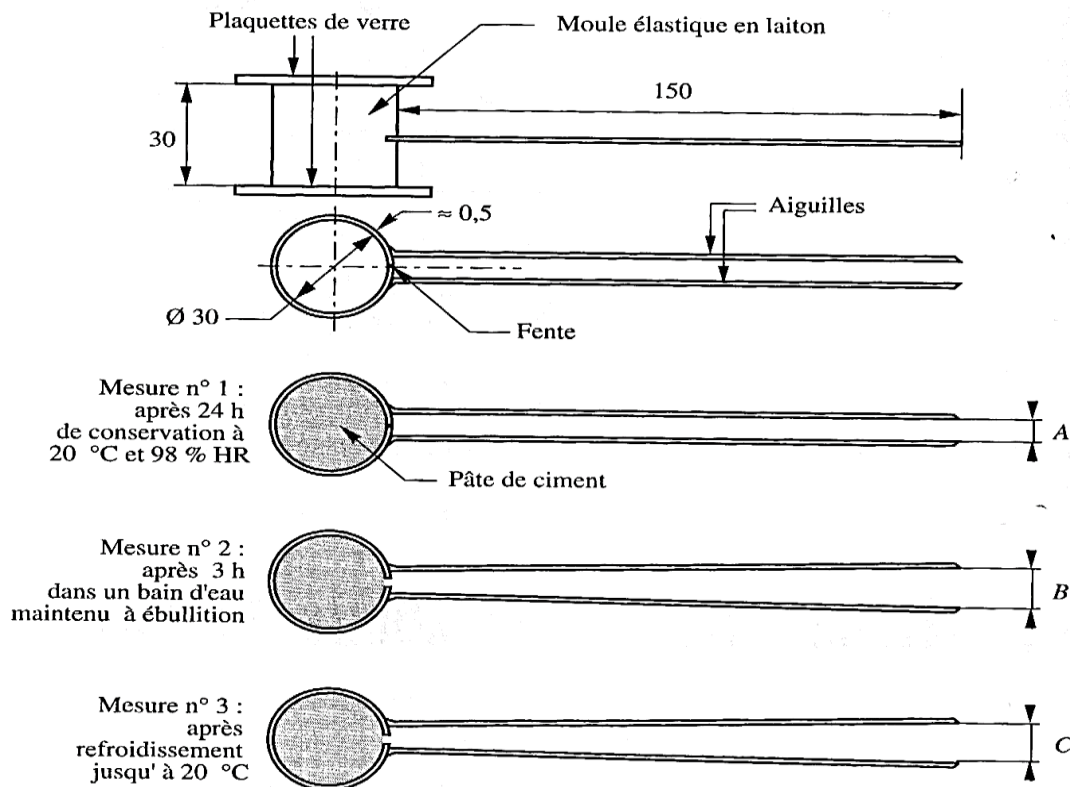


Figure II.9: Schéma explicite de la détermination de la stabilité par l'appareil Lechatelier[67]

II.4.5- Détermination des résistances mécaniques :[68]

La méthode comprend la détermination des résistances à la compression et à la flexion d'éprouvettes de forme prismatique et de dimensions 40 mm X 40 mm X 160 mm

Protocole

Confection des éprouvettes : Une éprouvette comprend :

-450g de ciment à étudier.

-225 g d'eau.

-1350 g de sable normalisé CEN EN 196-1 (commercialisé en sacs de 1350g).

Afin de confectionner une éprouvette, on verse l'eau dans un récipient et on introduit le ciment. On met alors immédiatement le malaxeur en marche à petite vitesse et après 30s, on introduit régulièrement tout le sable. On met le malaxeur à sa vitesse la plus élevée et on continue à mélanger pendant 30s supplémentaires. On arrête le malaxeur pendant 1 min 30s. On enlève au moyen d'une raclette tout le mortier adhérent aux parois et au fond du récipient

en le repoussant vers le milieu de celui-ci. On reprend ensuite le malaxage à grande vitesse pendant 60s.

Les éprouvettes doivent être moulées immédiatement après la préparation du mortier. Le moule et sa hausse sont fermement fixés à la table à chocs (figure II.10). On introduit en une ou plusieurs fois, avec une cuillère convenable, la première de deux couches de mortier dans chaque compartiment de moule, directement à partir du récipient de malaxage. Ensuite, on serre la première couche de mortier par 60 chocs. Puis on introduit la seconde couche de mortier et on serre à nouveau par 60 chocs. Enfin on retire avec précaution le moule de la table à chocs et on ôte la hausse. L'excès de mortier est enlevé avec une règle métallique plate.



Figure II.10 : moule sur la table à chocs.

On effectue le démoulage, pour les essais à 24h, au plus tôt 20 min avant l'essai.

On effectue le démoulage, pour les essais au-delà de l'échéance de 24h, entre 20h et 24h après le démoulage.

Enfin on marque convenablement les éprouvettes à conserver dans l'eau, pour l'identification ultérieure.

On immerge les éprouvettes, verticalement dans l'eau à $(20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C})$. On sépare les éprouvettes de façon telle que l'eau puisse accéder librement aux six côtés des éprouvettes. On compte l'âge des éprouvettes à partir du moment du malaxage du ciment et de l'eau, jusqu'au début de l'essai, et on effectue les essais de résistance à différents âges dans les limites suivantes :

- 48 h $\pm$ $\longrightarrow$ 30 min
- 7 jours $\pm$ $\longrightarrow$ 2h
- 28 jours $\pm$ $\longrightarrow$ 8h

II.4.5.1- Résistance à la flexion : [68]

On place le prisme dans un dispositif de flexion avec une face latérale de moulage sur les rouleaux d'appui et son axe longitudinal perpendiculaire à ceux-ci (figure II.11.a).

Puis on applique la charge verticalement par le rouleau de chargement sur la face latérale opposée du prisme et on l'augmente sans à-coups à raison de $50 \text{ N/s} \pm 10 \text{ N/s}$, jusqu'à rupture.

On conserve les demi- prismes humides jusqu'au moment des essais en compression sous une section de $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$. La résistance à la flexion R_f est calculée en N/mm^2 au moyen de la formule suivante:

$$R_f = \frac{(1,5 \times F_f \times L)}{B^3} \dots\dots\dots(\text{II.4})$$

Où

B : le coté de la section carrée du prisme, en millimètres (40 mm)

F_f : La charge appliquée au milieu du prisme à la rupture, en newtons.

L : la distance entre les appuis, en millimètres (100 mm) .

II.4.5.2- Résistance à la compression : [68]

On centre chaque demi prisme latéralement par rapport aux plateaux de la machine à $\pm 0,5 \text{ mm}$ près et longitudinalement de façon que le bout du prisme soit en porte à faux par rapport aux plateaux ou aux plaques auxiliaires d'environ 10mm (figure II.11.b). On augmente la charge sans à-coups à la vitesse de $2400 \text{ N/s} \pm 200 \text{ N/s}$ durant toute la durée d'application de la charge jusqu'à la rupture.

La résistance à la compression R_c est calculée en N/mm^2 au moyen de la formule suivante :

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \dots\dots\dots(\text{II.5})$$

Où :

F_c : la charge maximale à la rupture, en newtons.

1600: est l'aire des plateaux ou des plaques auxiliaires en millimètres carrés.



a) Essai de traction



b) Essai de compression

Figure II.11 : Appareil pour Essais de traction et compression type Toni-technique.

II.4.6- Détermination de la surface spécifique de Blaine : [65]

La finesse du ciment est mesurée sous forme de surface massique par perméabilité à l'air, en mesurant le temps de passage d'une quantité d'air donnée au travers d'un lit de poudre.

Le perméabilimètre de Blaine est un appareil utilisé pour déterminer la surface spécifique des ciments et autres produits en poudres (figure II.12).



Figure II.12: perméabilimètre de Blaine (Toni PERM).

II.5-Analyses gravimétrique :

Les dosages par gravimétrie englobent les tests suivants :

II.5.1-Détermination de la perte au feu PAF : [64]

La perte au feu est déterminée par calcination. Le gaz carbonique et l'eau sont chassés et les éléments oxydables éventuellement présents sont oxydés.

Protocole

On pèse dans un creuset préalablement calciné et taré 1g de l'échantillon, et on place le creuset couvert dans le four à une température de 975 ± 25 °C. Après 5min de chauffage, on retire le couvercle. On laisse le creuset dans le four pendant 3 heures.

Enfin, on refroidit le creuset dans le dessiccateur à la température ambiante, et on pèse.

La PAF est donnée par l'expression suivante :

$$PAF (\%) = \left(\frac{P_1 - P_2}{P_0} \right) \times 100 \dots\dots (II.6)$$

Où :

P_0 : prise d'essai de l'échantillon (g).

P_1 : masse du creuset avec 1g de l'échantillon (g).

P_2 : masse du creuset après calcination (g).

II.5.2-Détermination du taux d'humidité : [69]

Une prise d'essai de 100g(P_0) de l'échantillon est mis dans une capsule. On pèse la capsule et son contenu (P_1) que l'on étuve par la suite à $105^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ pendant 2h. Enfin, on pèse la capsule après être refroidie (P_2).

Le taux d'humidité est estimé par:

$$\% \text{ Humidité} = \frac{P_1 - P_2}{P_0} \times 100 \dots\dots (II.7)$$

II.6-Analyse granulométrique du sable : [70]

L'analyse granulométrique du sable s'effectue par tamisage. Cet essai consiste à déterminer la distribution dimensionnelle des grains constituant un granulat dont les dimensions sont comprises entre 0,08 et 125 mm.

Protocole

L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis, un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes.

1000 g (m1) de l'échantillon sont versés dans le premier tamis de la série de tamis. On pèse le refus du tamis ayant la plus grande maille : soit R1 la masse de ce refus. On poursuit la même opération avec tous les tamis de la colonne pour obtenir les masses des différents refus cumulés. Les masses des différents refus cumulés R_i sont rapportées à la masse totale de l'échantillon m1.

II.7- Essai d'équivalent de sable (ES):[71]

L'essai d'équivalent de sable est utilisé de manière courante pour évaluer la propreté des sables dans le domaine des matériaux de construction. Cet essai consiste à séparer les particules fines contenues dans l'échantillon, des éléments sableux plus grossiers. Il rend compte globalement de la quantité d'éléments fins en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments sableux qui sédimentent et les éléments fins qui flocculent.

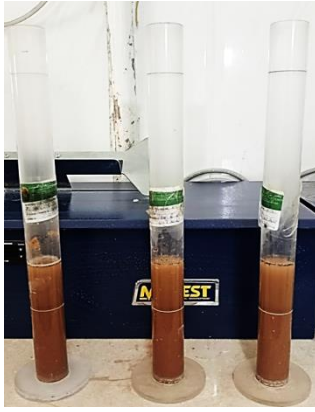
Il est exprimé par la Masse de sable mélangée à une solution flocculante et mesure de la hauteur de sédiment rapportée à la hauteur totale de matériaux

Protocole

L'essai consiste à laver 120 g d'échantillon (passé au tamis d'ouverture 5 mm) dans des conditions normalisées et laisser reposer.

On procède sur trois éprouvettes que l'on remplit avec la solution lavante, jusqu'au premier trait de jauge de l'éprouvette. On y verse dans chacune 120g d'échantillon en éliminant les bulles d'air (figure II.13 a).

On bouche les éprouvettes et on les agite par des mouvements rectilignes horizontaux de 20 cm d'amplitude, 90 allers retours en 30 secondes (figure II.13-b). On plonge le tube plongeur dans les éprouvettes (figure II.13-c). On rince le bouchon au-dessus de l'éprouvette. On fait descendre le tube laveur en le faisant tourner entre les doigts pour laver les parois intérieures de l'éprouvette. On lave l'échantillon en faisant descendre et remonter lentement le tube laveur dans la masse de l'échantillon pour faire remonter les particules fines dans la solution supérieure. On fait sortir le tube. On ferme le robinet lorsque le niveau du liquide atteint le trait de jauge supérieur de l'éprouvette, puis on laisse reposer 20 mn en évitant toute vibration. On mesure à vue les hauteurs h_1 et h_2 . L'équivalent de sable ES visuel d'une prise d'essai par un échantillon est donné par la formule :



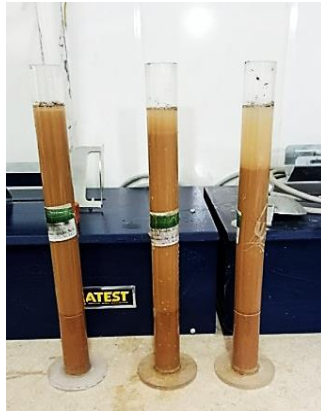
a) sable avec la solution lavante dans les trois éprouvettes



b) agitation des éprouvettes (mouvements rectilignes horizontaux)



c) tube plongeur dans l'éprouvette



d) Laisser reposer



e) Mesurer les hauteurs

FigureII. 13: Démarches de l'essai équivalent sable.

$$ES = \frac{h_2}{h_1} * 100 \dots \dots \dots (II.7)$$

Où :

h_1 : la hauteur supérieure du floculat par rapport au fond de l'éprouvette.

h_2 : la hauteur supérieure de la partie sédimentée par rapport au fond de l'éprouvette.

II.8-Masse volumique apparente du sable: [72]

Cet essai permet de déterminer la masse volumique apparente d'un corps. Cette masse volumique intègre les grains de l'agrégat ainsi que les vides compris entre les grains.

Protocole

On remplit un récipient dont on connaît le volume V, en prenant de grandes précautions pour éviter les phénomènes parasites provoqués par le tassement. On pèse ensuite l'échantillon M en prenant soin de déduire la masse du récipient M0 (figure II.14).



a) Pesée du Récipient vide M0



b) Pesée du Récipient rempli d'échantillon M1

Figure II.14 : Evaluation de la masse volumique apparente.

La masse volumique apparente $M_v \text{ App}$ est donnée par :

$$M_v \text{ App (g/cm}^3\text{)} = M/V \dots\dots\dots (\text{II.8})$$

Où

M : masse du matériau étudié en g

V : volume du récipient en cm^3

II.9-Masse volumique absolue :[73]

La masse volumique absolue est indiquée, par unité de volume, en prenant la masse absolue de chaque matériau sans tenir compte des vides existants qu'ils soient dans ou entre les grains.

Protocole

Nous avons utilisé la méthode au pycnomètre (figure II.15). Cette méthode est très simple et très rapide.

On pèse le pycnomètre au gramme près et on détermine sa masse **P1**. On remplit le pycnomètre avec l'eau de robinet jusqu'au repère et on détermine sa masse **P2**. Ensuite, on met 300g d'échantillon **M** dans le pycnomètre vide et on détermine sa masse **P3** ($P1+M$). On ajoute de l'eau dans le pycnomètre jusqu'au repère et on pèse l'ensemble soit **P4**.

La masse volumique absolue est déterminée par la relation suivante :

$$P_{abs} \text{ (g/cm}^3\text{)} = \frac{P3 - P1}{(P2 - P1) - (P4 - P3)} \dots\dots\dots (II.9)$$



a) Pesée du pycnomètre vide

P1



b) Pycnomètre rempli d'eau

P2



c) Pycnomètre rempli d'eau
avec l'échantillon **P4**

Figure II.15 : Evaluation de la masse volumique absolue par le pycnomètre.

II.10-Analyse granulométrique:[70]

L'analyse granulométrique s'intéresse à la détermination de la dimension des grains et aussi les proportions des particules solides de différentes tailles qui constituent le matériau.

Cette manipulation consiste à prendre un échantillon de sol séché au préalable et de le verser dans une colonne de tamis dont les tamis sont classés dans l'ordre croissant des ouvertures de bas en haut. La pesée des refus des tamis permet de tracer la courbe granulométrique.

Protocole

On commence par dresser la colonne des tamis. Les ouvertures des tamis (Figure II.16) doivent être croissantes de bas en haut. Les tamis à prendre en compte sont en mm :

10- 8- 5 -3



a) tamis d'ouvertures différentes



b) série de tamis

Figure II.16 : Matériel utilisé dans l'analyse granulométrique.

II.11-Taux d'Absorption d'eau : [74]

Le coefficient d'absorption d'eau est une mesure des pores accessibles à l'eau et traduit le rapport entre l'augmentation de masse d'un échantillon de granulats après imbibition par l'eau et sa masse sèche (obtenue après passage à l'étuve).

Protocole (figure II.17)

On sèche l'échantillon dans l'étuve pendant une demi-heure, puis on pèse le récipient, puis on place l'échantillon dans le récipient et on pèse l'ensemble (échantillon +récipient).

On immerge l'échantillon dans l'eau pendant 24 h après avoir épongé soigneusement avec un chiffon absorbant l'eau.(M1)

On Place l'ensemble (échantillon +récipient) dans l'étuve avec température réglée à $(105 \pm 5^\circ\text{C})$, et on pèse l'échantillon sec(M2).

Le pourcentage d'absorption d'eau est déterminé par la relation suivante :

$$Ab(\%) = ((M1 - M2)/M2) * 100 \dots \dots \dots (II.10)$$

M1 en (g): la masse du l'échantillon immergé pendant 24 heures dans l'eau après avoir épongé soigneusement avec un chiffon absorbant l'eau à la surface des granulats ou plus connue sous le nom SSS (Saturé à Surface Sèche),

M2 en (g): la masse de l'échantillon séché à $105 \pm 5^\circ\text{C}$



a) Etuvage de l'échantillon



b) Pesée de la matière sèche



c) Immersion de la matière dans l'eau



d) éponger la surface des grains de l'échantillon par un chiffon

Figure II.17 : Détermination de l'absorption de l'eau.

II.12-Essai du bleu de méthylène:[75]

Cet essai est effectué afin d'évaluer la quantité et la qualité de la fraction argileuse à partir de la surface spécifique.

Protocole

On prend 105 grammes de l'échantillon préalablement séché et passé au tamis d'ouverture 2mm. Cette prise d'essai est mise en suspension dans 500ml d'eau distillée. La suspension est mise sous agitation avec une vitesse de 700 tr/min, afin de disperser la suspension pendant 5 min. A l'aide du dispositif de dosage, on introduit 5 ml de bleu de méthylène (50 g/l) et on met sous agitation (400 tr/min) pendant 5 min (figure II.18.a).

Ensuite, à l'aide d'une baguette en verre, on dépose une goutte de la suspension sur le papier filtre (figure II.18.b).

On dira que le test de la tache est négatif si la tache déposée sur le papier filtre est sans auréole. Dans ce cas, on ajoute 5 ml de bleu de méthylène, on laisse sous agitation pendant une minute et on refait l'essai de la tache.

Cette opération sera répétée autant de fois qu'il sera nécessaire (Tant que le test de la tache restera négatif).(figure II.21.c)

Dans ce cas, on procède à 5 tests successifs de la tache (à raison d'un test par minute) sans ajouter de bleu de méthylène. Si les 5 tests s'avèrent positifs, l'essai est terminé.

Si le 2ème, 3ème ou 4ème test de la tache devient négatif. On obtient une tache sans auréole, on ajoute uniquement 5 ml de bleu de méthylène et on reprend les tests de la tache de départ jusqu'à ce que les 5 tests de la tache soient positifs.



a) Dispositif expérimental



b) Dépôt des gouttes sur le papier filtre



c) La tache forme une auréole teste positif

Figure II.18 : Procédure de réalisation de l'essai au bleu de méthylène.

La valeur de bleu méthylène d'un échantillon s'exprime en grammes de colorant par Kg de la fraction 0/2. Elle est estimée par la relation suivante :

$$M_B = (V_1/M_1) * 10 \dots \dots \dots (II.11)$$

V1 : le volume de bleu méthylène ajouté (ml).

M1 : la masse de l'échantillon pesé (g)

II.13-Lixiviation :

La lixiviation permet d'étudier le phénomène de relargage des espèces en dehors de la matrice solide étudié.

Protocole

Les mortiers obtenus après une échéance de 28 jours ont été mis en solution dans de l'eau distillée en respectant un rapport eau/ solide = 16

Les paramètres : pH, conductivité, sont ensuite mesurés après un séjour de : Zéro jour, un jour, deux jours et n jours.

II.14-Durabilité de mortiers dans l'eau et dans un milieu acide :

La durabilité peut être définie comme la résistance du ciment aux agressions chimiques et physico-chimiques en maintenant son comportement et ses performances en de bonnes conditions.

Protocole

On plonge l'éprouvette de ciment à étudier d'échéance 24h, dans l'eau saturée en chaux pendant 27 jours.

Après échéance, on pèse l'éprouvette ensuite on la plonge dans une solution de 5% (H_2SO_4). Le milieu d'immersion doit respecter un pH de 6 – 8. Le pH du milieu d'immersion doit être contrôlé chaque jour en ajustant le pH si nécessaire avec l'ajout de l'acide (H_2SO_4 :0,1N)

Le milieu d'immersion est renouvelé tous les 7 jours. Le jour de l'examen (chaque deux jours), les parties attaquées de mortier sont nettoyées avec de l'eau, puis on laisse les échantillons sécher pendant une demi-heure, et enfin évaluer par la mesure de la perte de masse de l'éprouvette.

CHAPITRE III

C

**ARACTERISATION DES
MATIERES PREMIERES
UTILISEES DANS LA
CIMENTERIE DE SAIDA**

III.1-Introduction :

Dans ce chapitre, nous exposons les matériaux utilisés dans cette étude et leurs caractéristiques. La caractérisation des propriétés physico-chimiques des matériaux utilisées dans la conception du ciment est d'une importance cruciale puisque ces propriétés impactent directement le comportement du liant confectionné à l'état anhydre et de son mortier.

Les propriétés physiques des matériaux à étudier sont la granulométrie, la masse volumique ainsi que le taux d'absorption d'eau.

Notons que la composition chimique est aussi importante afin de s'assurer du dosage adéquat pour la préparation du cru et aussi pour l'identification de l'ajout utilisé dans la préparation du ciment composé.

Le type de ciment confectionné dans cette étude est un ciment Portland composé dont la désignation est donnée dans le tableau III.1

Tableau III.1 : Désignation du Ciment produit par la cimenterie de Saida.

Désignations	Notation	Clinker	Autres constituants	Constituants secondaires
Ciment Portland Composé	CPJ-CEM II /A	80%-94%	6%-20%	0-5%

Nous avons utilisé un ciment CEMI produit par la cimenterie de Saida (94% clinker, 6% gypse)

Les matières additives utilisées sont le calcaire (ajout utilisé actuellement par la cimenterie de Saida) avec des proportions de 10, 13, 15 et 20%

Pour donner à l'étude un caractère environnemental et économique, nous avons étudié la possibilité d'utiliser une addition conçue de déchets céramiques afin de valoriser un résidu de fin de cycle dans le bâtiment. Les résultats de cette étude nous permettent de mettre en évidence tous les effets physiques et chimiques des additions sur les matériaux cimentaires issus de la cimenterie de Saida.

III.2- Provenance et propriétés des matières premières :

Les propriétés d'un ciment produit dépendent fortement des caractéristiques des matières premières, des matières de correction dans la production du clinker ainsi que les matières d'addition pour la conception du ciment avec ajout.

Les matières utilisées dans ce travail sont :

- **Matières premières du cru** : calcaire, argile
- **Matières secondaires** : gypse, calcaire
- **Matières de correction** : Minerai de Fer, Sable
- **Matière recyclée comme ajout** : déchet de céramique

Toutes ces matières sont disponibles en abondance en Algérie.

III.2.1-Matières premières du cru de la cimenterie de Saida :

Les matières premières ont été prélevées de leurs aires de stockage réciproques.

III.2.1.1-Calcaire :

Le calcaire (Figure III.1) est extrait de la carrière Hassasna située à 3km de la Cimenterie de Saida. Cette carrière est exploitée par la cimenterie de Saida depuis 1979 avec une réserve de 150 ans.

Cette matière première est utilisée dans la préparation du cru comme source de chaux et comme filler dans la conception du ciment composé. Sa composition chimique est présentée dans le tableau III.2.



Figure III.1 : Morceaux de calcaire provenant de la cimenterie de Saida.

Tableau III.2 : Composition chimique du calcaire exploité par la cimenterie de Saida.

Composition chimique (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	PAF
Calcaire	3,414	1,236	52,455	0,565	0,234	0,158	0,268	0,022	41,52

La teneur en CaO et la perte au feu (PAF), sont les plus importantes lors des analyses chimiques.

Le taux de chaux dans le calcaire est de 52,455%. Le rapport CaO/SiO₂ est de 15,36.

La forte teneur en perte au feu est principalement due au CO₂ dégagé lors de la dissociation du carbonate de calcium à 900°C et celui de l'impureté de carbonate de magnésium à environ 600°C.

La composition du calcaire peut varier d'une cimenterie à l'autre en fonction de la qualité du gisement exploité (tableau III.3). Le calcaire extrait par la cimenterie de Saida comporte 93,54% CaCO₃ et renferme une quantité appréciable de Fe₂O₃ (0,565%) comparée à celle des calcaires exploitées par les cimenteries algériennes citées dans le tableau III.3. Nous pouvons le classer comme calcaire marneux [76]. Le calcaire utilisé par la cimenterie de Saida satisfait aux normes exigées pour son utilisation comme constituant principal dans la production du clinker et aussi comme ajout filler [77].

Tableau III.3 : Composition chimique du calcaire exploité par différentes cimenteries algériennes.

Composition Chimique (%)	Cimenterie de			
	Zahana Oran [78]	Ain ElKebira-Setif[79]	SCSigus Oum El Bouaghi[80]	Chlef[81]
SiO ₂	10,34	12,16	0,70	0,55
Al ₂ O ₃	2,27	1,14	0,35	0,40
CaO	43,14	46,69	53,4	53,13
Fe ₂ O ₃	0,15	0,57	0,13	0,17
MgO	0,34	0,81	1,3	0,53
SO ₃	0,15	0,65	0,16	00
K ₂ O	0,31	0,039	0,11	0,09
Na ₂ O	0,02	-	0,01	0,12
PAF	-	37,933	-	43,13

III.2.1.2-Argile :

L'argile (Figure III.2) est extraite de la carrière d'Ain Elhdjar située à 25 km de la cimenterie de Saida. L'exploitation de cette carrière par la cimenterie de Saida a commencé en 1979 avec une réserve de 110 ans pour une durée d'exploitation de 43 ans.



Figure III.2 : Morceaux d'Argile provenant de la cimenterie de Saida.

La composition chimique de l'argile est présentée dans le tableau III.4.

Tableau III.4 : Composition chimique de l'argile exploitée par la cimenterie de Saida.

Composition chimique %	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	PAF
Argile	56,101	13,595	7,765	5,905	1,062	0,094	2,634	0,101	11,80

Le rapport Si/Al est de 4. Le taux de Fe₂O₃ est élevé pour une argile donnée. L'exploitation de la carrière d'argile au cours des années a montré une variété de compositions chimiques (tableau III.5)

Au cours des années, le taux des alcalis contenu dans l'argile a augmenté (figure III.3), ce qui a poussé l'entreprise à utiliser une deuxième source de silice afin de diminuer les alcalis dans le cru cimentier.

Tableau III.5 : Composition chimique de l'argile exploitée par la cimenterie de Saida au cours de la dernière décennie

Composition chimique (%)	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	PAF
2010	0,095	1,33	10,91	46,19	0,11	2,275	16,38	5,68	14,55
2012	0,250	1,82	13,72	47,43	0,00	2,73	10,13	6,56	14,80
2013	0,248	1,97	14,61	51,00	0,64	2,781	6,05	8,51	13,10
2014	0,217	1,89	14,79	51,53	0,22	2,795	7,15	8,04	12,20
2017	0,019	1,87	14,25	50,19	0,034	2,96	8,60	6,55	13,80
2018	0,050	2,04	16,65	53,79	0,020	3,680	5,18	7,35	11,20
2019	0,180	2,03	17,14	56,61	0,150	4,43	3,94	7,13	7,48

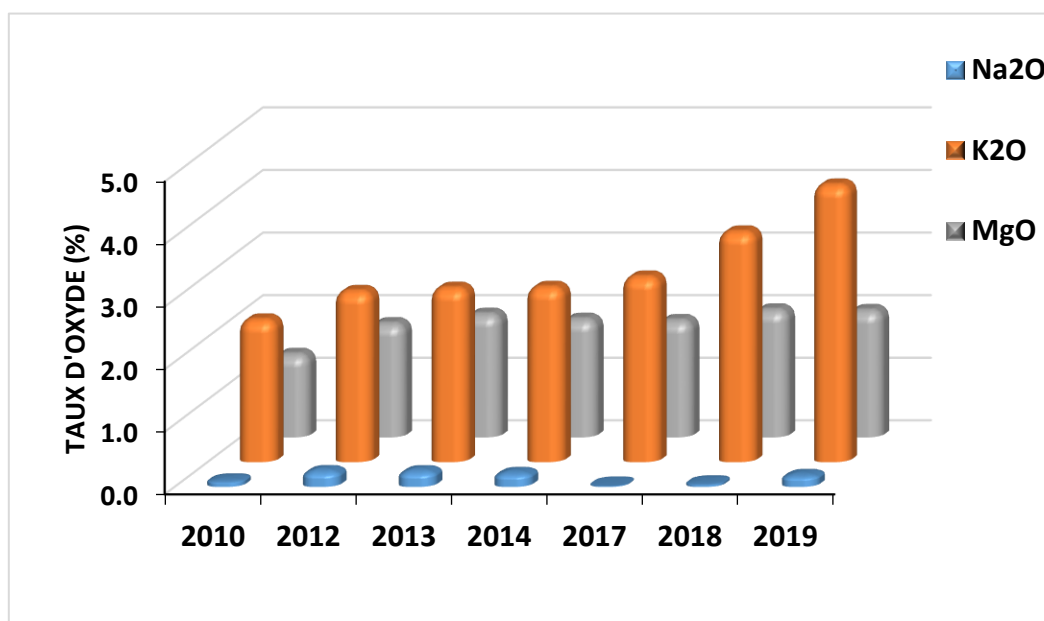


Figure III.3 : Evolution du taux des alcalis et de la Magnésie dans l'argile exploitée par la cimenterie de Saida au cours de la dernière décennie

Aussi nous constatons que le taux de MgO a augmenté (figure III.3) au cours des dernières années. Ceci peut influencer la qualité du clinker obtenu. En effet, un taux de magnésie élevé

peut conduire à l'augmentation du taux de chaux libre et aussi à augmenter la viscosité de la phase liquide lors de la cuisson du cru [82].

La cimenterie a opté pour le sable comme correcteur du taux de silice et d'alumine dans le cru.

III.2.2-Correcteurs :

Les matériaux correcteurs permettent d'ajuster le dosage du cru en oxyde de fer (Fe_2O_3) et en silice (SiO_2) afin d'atteindre la composition souhaitée.

III.2.2.1-Mineral de fer :

Le Mineral de fer (Figure III.4) est fourni par la Société des Mines de Fer SOMIFER (Rouina - Ain Defla) distante de 300 Km de la cimenterie de Saida. Cette matière est ajoutée selon un dosage bien précis afin d'ajuster le taux d'oxyde de Fer dans le cru. Sa composition chimique a été déterminée et reportée sur le tableau III.6.



Figure III.4 : Morceaux de Mineral de Fer provenant de la cimenterie de Saida.

Tableau III.6 : Composition chimique du mineral de Fer (SOMIFER).

Composition chimique (%)	SiO_2	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	PAF
Mineral de Fer	28,237	1,705	6,859	50,423	0,194	0,256	0,212	0,056	11,80

III.2.2.2-Sable :

Le sable (Figure III.5) est fourni par SARL OR-BAT situé à Ras ELmaSidi-Bel-Abbes (Bidou) distante de 140km de la cimenterie de Saida. Cette matière est ajoutée selon un dosage bien précis afin d'ajuster la composition du cru. L'utilisation du sable comme correcteur dans le cru de la cimenterie de Saida n'a été effectué qu'à partir du 23/04/2021 ; et cela est dû au taux élevé des alcalis ainsi que de la Magnésie dans l'argile, constaté depuis ce jour. La carrière exploitée est caractérisée par un taux d'alcalis élevé ainsi que de celui de la Magnésie. Le sable est stocké dans un abri à sable au niveau de la cimenterie. Le tableau III.7, présente la composition chimique de ce correcteur.



Figure III.5 : Sable utilisé par la cimenterie de Saida.

Tableau III.7 : Composition chimique du sable (OR-BAT).

Composition chimique %	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	PAF
Sable	88,536	2,208	2,321	0,742	0,898	0,01	0,63	0,025	11,80

La composition chimique du sable présente une proportion élevée en SiO₂, mais avec un taux de chaux et d'alumine évalués à plus de 2%.

a-Granulométrie du sable :

Le tableau III.8 résume les résultats de la distribution granulométrique des particules de sable utilisé comme correcteur.

Tableau III.8 : Analyse granulométrique du sable.

Sable	tamis ouverture (mm)					
	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	0,08
Refus (%)	0,36	0,57	1,77	15,64	73,91	96,78

Nous constatons que le sable possède une granulométrie de diamètre D dans la fourchette : $0,08\text{mm} < D < 0,63\text{mm}$.

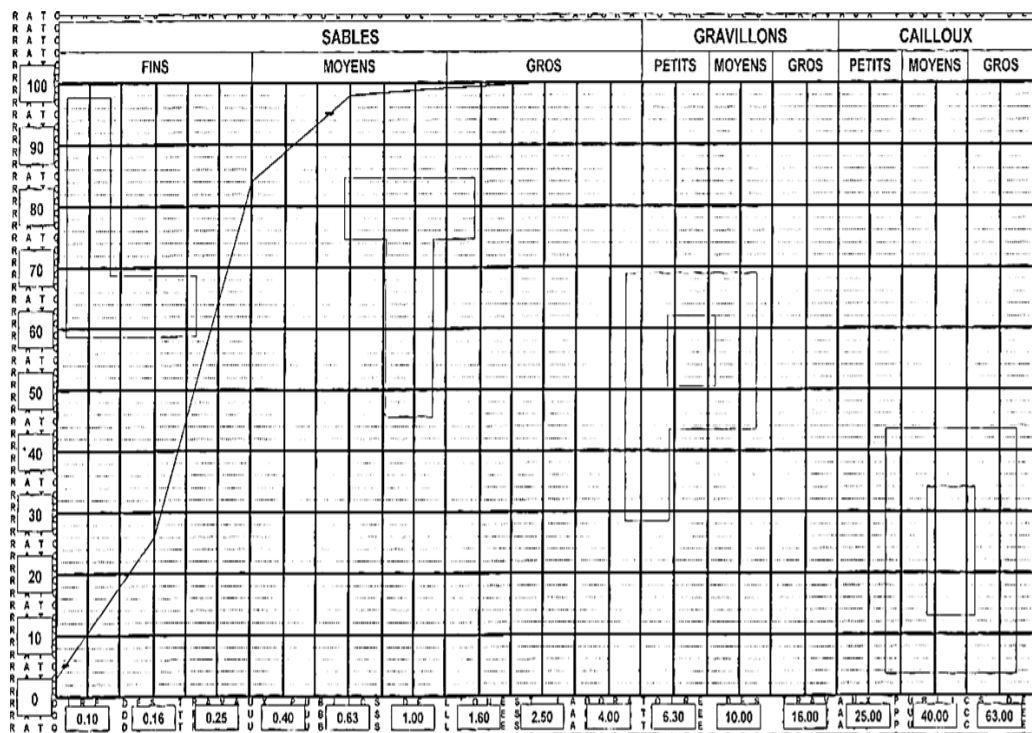


Figure III.6 : courbe granulométrique du sable de correction

A travers la courbe granulométrique (figure III.6), nous concluons que le sable utilisé comme correcteur est classé comme sable fin. L'équivalent de sable (ES) est estimé à **30,54%**, ce qui correspond au taux d'impuretés contenu dans le sable.

b-Caractéristiques physiques du sable :

Les propriétés physiques du sable ont été déterminées et sont exposées dans le tableau III.9.

Selon les résultats obtenus (tableau III.9), le sable peut être classé dans la catégorie de sable limoneux ($0,2 \leq M_B < 2,5$) [83].

Tableau III.9 : Caractéristiques physiques du correcteur : sable.

Propriétés physiques	Masse volumique absolue (g/cm ³)	Masse volumique apparente (g/cm ³)	Valeurs au bleu de méthylène M _B (g/kg)
Sable	2,62	1,44	1,46

III.3-Caractérisation du cru préparé par la cimenterie de Saida :

Le clinker obtenu est le résultat de la cuisson de la farine crue préparée selon le dosage présenté dans le tableau III.10.

Tableau III.10 : Dosage des constituants de la farine crue utilisée dans la production du clinker.

Constituants du cru	Argile	Calcaire	Sable	Minerai de fer
Dosage(%)	21,50	74,79	2,51	1,20

Ce cru doit répondre aux paramètres de fonctionnement. Les estimations des différents modules de fonctionnement sont exposées dans le tableau III.12.

Tableau III.11 : composition chimique du cru.

Composition chimique (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	PAF
Cru	13,17	3,286	43,769	2,023	0,422	0,1	0,776	0,035	36,13

Le cru préparé par la cimenterie de Saida présente un rapport SO₃/MgO= 0,24 donc inférieur à l'unité. Le taux de SO₃ n'excède pas 1%. La somme des alcalis (Na₂O+K₂O) est inférieure à 1,5%. Ces résultats prouvent que le cru de la cimenterie présente une composition adéquate pour la formation des phases minéralogiques du clinker [84, 85].

Tableau III.12 : Modules de saturation du cru utilisé.

Module de saturation	HM	MS	AF	LSF
Farine crue	2,34	2,49	1,46	102,97

A partir des résultats obtenus (tableau III.12), le module $HM=2,34$, ainsi il est en dehors de l'intervalle $1,7 < HM < 2,2$, ce qui prévoit un clinker avec une instabilité volumique (le problème de gonflement peut se poser) [86].

Une valeur élevée de MS correspond à une valeur élevée de silice (SiO_2) au détriment des agents fondants (Al_2O_3 et F_2O_3), alors qu'une faible valeur provoque un encroûtement excessif dans la zone de clinkérisation, pouvant ainsi engendrer des nuisances pour le bon fonctionnement du four [87]. Le module de silice contrôle aussi la broyabilité. Le module silicique du cru de la cimenterie de Saida est dans l'intervalle $2,4 \leq MS \leq 2,7$, ce qui peut éviter une cuisson difficile par manque de fondants ; une réduction de la croûte au four.

Le module alumino-ferrique est insuffisant pour assurer la synthèse d'un clinker portland ($1,5 < AF < 2,5$) vu le déficit en fondants.

Nous pouvons avancer que selon les modules calculés la composition du cru est dans un intervalle favorable pour l'obtention d'un clinker portland.

III.4-Caractérisation du clinker produit par la cimenterie de Saida

Le clinker est le constituant principal du ciment (figure III.7). Sa caractérisation chimique est exposée dans le tableau III.13



Figure III.7 : Clinker produit par la cimenterie de Saida.

Tableau III.13 : Composition chimique du clinker produit par la cimenterie de Saida.

Composition chimique %	SiO_2	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	CaO_L	Résidu sec	PAF
Clinker	21,73	4,96	66,85	3,16	0,94	0,20	0,929	0,044	1,32	0,3	0,60

La composition chimique globale du clinker (tableau III.13) est typique d'un ciment portland (tableau I.1). La teneur en sulfates est de 0,20%, ce qui correspond à une valeur acceptable (1-3%)

La composition de Bogue présentée dans le tableau III.14 a été calculée à partir de l'analyse spectrale du ciment mesurée par spectrométrie SFX.

Tableau III.14 : Composition minéralogique du clinker produit par la cimenterie de Saida

Composition minéralogique (%)	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Clinker	62,33	15,29	7,81	9,59

La phase C₃S constitue 62,33 % du ciment, ce qui assurera le développement de meilleures résistances initiales. La phase C₂S est de 15,29%, les phases C₃A et C₄AF présentent 7,81% et 9,59% du ciment respectivement. La quantité faible de C₃A permettra de baisser la chaleur d'hydratation et contribuera à résister aux agents agressifs [88]. La composition de Bogue déterminée est typique d'un ciment Portland (tableau I.2).

III.4.1-Estimation des modules chimiques de saturation (clinker) :

Nous pouvons estimer l'efficacité du clinker obtenu en calculant les modules chimiques (tableau III.15)

Tableau III.15 : modules chimiques de saturation du clinker.

Module de saturation	HM	MS	AF	LSF
Clinker produit	2,24	2,68	1,57	0,97

Il n'y a pas de formule idéale ou de formule universelle pour le clinker. La composition du Ciment Portland varie d'un ciment à l'autre principalement en raison des spécifications locales du ciment et de la composition chimique et minéralogique des matières premières exploitées par la cimenterie. Chaque production présente un clinker unique [89].

La valeur du module hydraulique est dans les normes ; En général il équivaut à 2. Le module hydraulique est souvent utilisé par les cimentiers pour prédire l'activité hydraulique sur le développement des résistances mécaniques.

Plus HM est élevé et plus l'activité hydraulique du liant sera élevée. Si $HM > 2,4$, la résistance à court terme sera faible de même que lorsque $HM < 1,7$ [90].

Le module silicique prouve que le clinker obtenu développe une bonne résistance initiale et un temps de prise dans les normes. Le facteur de saturation de la chaux ne dépasse pas 1,02. Le module silicique permet de prévoir la formation d'une phase liquide suffisante pour obtenir un clinker non poussiéreux.

En validant ces paramètres, nous pouvons avancer que le clinker obtenu a une réactivité de référence.

III.5-Ajouts secondaires :

Les propriétés physico-chimiques des ajouts utilisés dans cette étude ont été déterminées afin d'évaluer leur influence sur le ciment confectionné.

III.5.1-Gypse :

Le gypse (Figure III.8) est ajouté avec un taux de 6% dans tous les ciments élaborés, comme régulateur de prise. Cette matière est fournie par SARL HTAM située à LAGHOUAT distante de 338 km de la cimenterie de Saida. Sa composition chimique est donnée dans le tableau III.16



Figure III.8 : Gypse utilisé par la cimenterie de Saida.

Tableau III.16 : Composition chimique du gypse.

Composition chimique %	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	PAF
Gypse	4,85	0,72	31,18	0,11	0,2	41,6	0,06	0,03	21,2

Selon les résultats obtenus, le taux de SO_3 est de 41,6% et le taux de CaO que comporte le gypse est de 31,18%. Ceci nous donne un aperçu sur la quantité de sulfate de calcium que peut comporter le gypse (72,78%).

III.5.2-Déchets de céramiques :

Les déchets de céramiques (Figure III.9) font partie des déchets de construction récupérés. Ce sont exclusivement des morceaux de faïences. Ce type de déchets peut être classé comme déchet inerte de démolition de bâtiments.



Figure III. 9: déchets de céramique collectés.

Le déchet récupéré a été en premier lieu concassé en grains grossiers (5-10 mm) (Figure III.10) au moyen d'un mortier manuellement.



Figure III.10 : déchet de céramique concassé.

La composition chimique globale du déchet céramique (tableau III.17) montre que le matériau contient principalement du silicium (66,25% exprimé en SiO_2), des alcalins (0,76% Na_2O et 3,28% exprimé en K_2O) et du calcium (3,33% exprimé en CaO).

Les compositions chimiques des différentes additions cimentaires, sont basés sur le système ternaire « SiO_2 - Al_2O_3 – CaO » mais leurs teneurs varient en fonction de l'addition. La nature des éléments mineurs et leurs teneurs varient considérablement selon le matériau, et dépend directement de la nature de l'addition.

Les teneurs en oxydes de fer et en oxyde d'aluminium sont relativement élevées (jusqu'à 18,49% pour l'aluminium et 5,39% pour le fer). Ces compositions sont à relier à la composition des matières première qui sont majoritairement sablo-argileuses.

Tableau III.17 : Composition chimique des ajouts.

Composition chimique (%)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	PAF
Calcaire	3,414	1,236	0,565	52,455	0,234	0,158	0,022	0,268	41,52
Déchet céramique	66,25	18,497	5,39	3,33	0,77	0,06	0,76	3,28	0,67

Les déchets céramiques se situent dans une partie plutôt siliceuse riche en silice et en aluminium comparés au calcaire.

Le déchet de céramique présente un caractère acide tel que la pouzzolane, alors que le calcaire a un caractère basique. On peut évaluer le caractère basique par l'indice de basicité selon le tableau III.18. Ce module doit être supérieur à l'unité afin d'affirmer le caractère basique.

Tableau III.18 : Module de basicité des additions cimentaires utilisées.

Ajout	Déchet céramique	Calcaire
Module de basicité ($\text{CaO}+\text{MgO}$)/ $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$	0,048<1	11,330>1

III.6-Valeurs au bleu de méthylène des ajouts utilisés :

La valeur du bleu de Méthylène permet d'évaluer le degré d'activité des fines argileuses que peut comporter l'ajout utilisé. Ces fines peuvent être responsables, dans une large mesure, de désordres et de non-qualité dans les bétons [91].

Selon les résultats obtenus (tableau III.19), le calcaire a un caractère de matériaux non argileux alors que le déchet céramique est classifié selon la valeur du bleu de méthylène comme matériau sablo limoneux

Tableau III.19 : Valeurs au bleu de méthylène M_B des ajouts cimentiers utilisés.

Matières	Calcaire	Déchet de céramique
M_B (g/kg)	0,140	0,243
surface spécifique ST (m^2/g)	0,014	0,025

La valeur au bleu de méthylène M_B du déchet de céramique montre que ce matériau possède une surface spécifique plus élevée que celle du calcaire.

III.7-Taux d'humidité des ajouts utilisés :

L'hygrométrie est un paramètre important puisqu'elle définit le degré de saturation en eau du matériau.

Le tableau III.20 présente les taux d'humidité des ajouts utilisés pour l'élaboration des ciments étudiés.

Tableau III.20 : Taux d'humidité des ajouts utilisés.

Matières	Sable de correction	Calcaire	Gypse	Déchet de céramique
Humidité (%)	5,5	4,14	2,50	0,20

Le sable ainsi que le calcaire apparaissent assez humides. Le déchet céramique est plutôt hydrophobe.

III.8-Taux d'absorption d'eau (A_b) des ajouts utilisés :

Le taux d'absorption d'eau (A_b) mesuré des additions cimentaires, est présenté sur le tableau III.21.

Tableau III.21: Taux d'Absorption d'eau des additions cimentaires utilisées.

Addition cimentaire	Calcaire	Déchet de céramique
Absorption d'eau A_b (%)	3,15	8,044

Le déchet de céramique absorbe plus (8,044%) que le calcaire (3,15%). Ceci peut se répercuter sur la consistance normale des pâtes de ciment.

La classification des différents types de carreaux de céramique selon leur taux d'absorption d'eau est fixée par la norme européenne EN 14411. Selon cette norme, le déchet céramique utilisé est classé comme carreau en faïence ($Ab > 6\%$).

III.9-Masse volumique (P_{ab}) des additions cimentaires utilisées :

Le calcaire est plus dense que le déchet céramique (tableau III.22).

Tableau III. 22 : masse volumique des constituants du ciment élaboré.

Constituant	Clinker	Calcaire	Déchet de céramique
$P_{ab} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	2,97	2,65	2,44

Lorsque nous substituons du clinker par un ajout selon un rapport massique bien précis (10, 13, 15, 20%), une diminution de la masse volumique du liant peut engendrer une augmentation du volume du ciment CPJ élaboré.

Toutes les additions utilisées ont donné lieu à une diminution de masse volumique. Nous pouvons préconiser un ciment plus léger lorsque nous augmentons le taux de substitution du clinker par le déchet de céramique par contre un taux de calcaire élevé dans la matrice cimentière peut engendrer un liant plus dense que le ciment aux déchets céramique.

III.10-Conclusion

Ce chapitre nous a permis de collecter des informations importantes concernant les différentes matières premières utilisées dans la cimenterie de Saida.

- L'exploitation de la carrière argile par la cimenterie de Saida au cours de ces dernières années a révélé l'extraction d'une argile riche en alcalis, ce qui est néfaste à la synthèse du clinker, Le sable utilisé comme correcteur de silice est un sable présentant une finesse élevée.
- Le clinker produit est riche en alite
- La composition élémentaire des additions est majoritairement basée sur le système SiO_2 , Al_2O_3 , CaO . Le déchet céramique proposé dans cette étude présente un taux d'adsorption d'eau élevé et une densité plus légère que celle du calcaire et du clinker.
- La nature géologique des carrières (chimie des matières premières) peut influencer dans l'avenir encore plus la composition du cru de la cimenterie de Saida., notamment la carrière d'argile.
- Ces résultats peuvent nous aiguiller dans la deuxième partie de cette étude portée sur la caractérisation des ciments produits par la cimenterie de Saida.

CHAPITRE IV

C **ARACTERISATION DES CIMENTS CONFECTIIONNES**

IV.1-Introduction :

Les additions cimentaires qui ont été considérées dans ce chapitre sont le calcaire, utilisé actuellement dans la cimenterie de Saida et le déchet céramique issu de déchets de démolition proposé dans cette étude.

Nous avons pris comme référence le clinker produit par la cimenterie de Saida. Nous avons commencé par analyser l'influence des additions sur les caractéristiques du ciment produit. Les formulations des ciments aux ajouts confectionnés sont rappelées dans le tableau IV.1

Tableau IV.1 : Formulation des ciments confectionnés.

ajout (%)	Composé		Ajout CPJ calcaire		Ajout CPJ déchet céramique	
	Clinker	Gypse	calcaire	Déchet céramique	calcaire	Déchet céramique
0	94	6	0	0	0	0
10	84	6	10	0	0	10
13	81	6	13	0	0	13
15	79	6	15	0	0	15
20	74	6	20	0	0	20

Ensuite, différentes propriétés physico-chimiques des ciments anhydres ainsi que les pates de mortiers ont été évaluées. Les résistances mécaniques ont été mesurées, et l'impact des additions sur les résistances est discuté.

IV.2- Caractérisation des ciments anhydres :

Les ciments confectionnés au niveau du laboratoire contrôle qualité de la SCIS Saida, sont des CPJ. Nous avons effectué un co-broyage des matières : clinker, gypse et matières d'addition. La granulométrie des composants des ciments élaborés est présentée dans le tableau IV.2

Le déchet céramique proposé présente une granulométrie plu fine que celle du clinker et de l'ajout utilisé par la cimenterie de Saida. La fraction de diamètre moyen 8-10mm est la plus élevée dans l'ajout que nous proposons. En effet, la granulométrie du clinker est plus importante que celle des deux ajouts cimentaires. Ces résultats peuvent avoir un effet sur les propriétés mécaniques du CPJ produit.

Tableau IV.2 : Granulométrie des constituants du ciment CPJ.

constituant		Refus (%)			
		tamis ouverture			
		3mm	5mm	8mm	10mm
clinker		4,25	17,21	15,47	62,42
gypse		1,93	3,5	8,26	85,27
Ajout	calcaire	11,73	14,83	13,61	57,66
	Déchet céramique	0,48	22,83	42,44	32,40

Les différentes proportions en gramme prises pour doser le ciment préparé sont exposées dans le tableau IV.3.

Tableau IV.3 : Dosage effectué pour la conception des CPJ étudiés.

CPJ ajout (%)	Composé (g)			
	Clinker	Gypse	Calcaire	Déchet céramique
0	1127	72	0	0
10	1008	72	120	120
13	972	72	156	156
15	948	72	180	180
20	888	72	240	240

IV.3-Composition chimique des ciments CPJ confectionnés :

La composition chimique des ciments est présentée dans le tableau IV.4

Comparées à celles du clinker, les teneurs en oxydes de calcium, silicium, aluminium et fer dans le ciment aux ajouts calcaire, sont légèrement plus basses, alors que les valeurs de perte au feu sont plus élevées. Cela est dû aux différentes substitutions du clinker par les additions cimentaires réalisées dans les ciments.

Contrairement aux CPJ calcaire, ceux aux ajouts déchets céramiques, les teneurs en oxydes de silicium, aluminium et fer, la perte au feu et la teneur en soufre, sont légèrement plus élevées, alors que les valeurs de l'oxyde de calcium sont plus basses. Cela est dû aux substitutions réalisées dans les ciments.

Tableau IV.4 : Composition chimique des CPJ confectionnés :

CPJ		Composition chimique (%)								
Taux ajout (%)	Ajout	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	PAF
0	SS	19,84	4,67	3,11	66,04	0,91	2,52	0,09	0,91	1,48
10	Calc	18,03	4,24	2,86	64,74	0,91	2,00	0,09	0,820	5,90
	céram	24,05	5,82	3,34	60,16	1,12	2,01	0,10	1,15	1,80
13	Calc	17,45	4,14	2,76	64,54	0,88	1,93	0,09	0,773	7,04
	céram	25,35	6,16	3,41	58,16	1,23	2,00	0,10	1,24	1,98
15	Calc	16,74	4,06	2,71	64,09	0,94	1,77	0,09	0,725	8,44
	céram	26,10	6,39	3,48	57,35	1,20	2,05	0,10	1,29	1,64
20	Calc	16,00	3,8	2,56	63,13	0,83	1,96	0,09	0,743	10,5
	céram	28,26	6,87	3,51	54,06	1,29	2,10	0,09	1,45	1,94

calc : calcaire, céram : déchet céramique

Le taux de Magnésie enregistré dans les différents ciments aux déchets céramiques est supérieur à celui des différents ciments au calcaire, mais il est inférieur à 3%. Le taux de MgO ne dépasse pas la norme exigée (3%). Au-delà de ce taux, cet élément peut conduire à un gonflement lors de l'hydratation du ciment.

Les ciments aux déchets céramiques sont plus riches en fer, en silice et en alumine par rapport aux autres ciments élaborés.

La perte au feu des ciments aux déchets céramiques présentent une perte au feu semblable à celle du CEMI, contrairement à ceux aux calcaires.

IV.4-Granulométrie des ciments CPJ confectionnés :

A partir de l'analyse granulométrique effectuée (tableau IV.5), nous pouvons remarquer que le ciment CPJ déchet céramique demande plus d'énergie afin d'avoir une finesse plus proche de celle du ciment Portland. Un taux de remplacement de 10% est plus approprié vu la granulométrie obtenue.

D'un autre coté les résultats démontrent que le CPJ céramique n'est pas aussi fin que le CPJ calcaire.

Le ciment incorporant le déchet céramique est caractérisé par la teneur en fraction 45 μ m comprise dans l'intervalle [23,67-26,97%].

Tableau IV.5 : Granulométrie des ciments CPJ confectionnés.

	CPJ ajout (%)	0	10	13	15	20
Refus (%) Tamis 45 μ m	calcaire	20,15	17,50	20,95	20,00	19,21
	céramique	20,15	23,67	26,53	26,85	26,97
Refus (%) Tamis 90 μ m	calcaire	3,83	4,26	7,31	6,81	4,67
	céramique	3,83	4,98	5,04	6,6	7,17

Dans le ciment aux ajouts céramique, le taux de particules de tailles supérieures à 45 μ m est plus important que celui aux 90 μ m, mais aussi à celui du ciment ajout calcaire. La limitation du taux d'incorporation du déchet céramique permet d'augmenter le taux de passant et d'éviter une consommation énergétique plus élevée voire un déclassement du ciment produit. Nous confirmons par cette analyse, l'intérêt pratique de viser un taux d'incorporation limité du déchet céramique dans la composition cimentière.

Aussi, nous pouvons avancer que le calcaire joue le rôle d'agent de mouture.

IV.5-Surface spécifique Blaine (SSB) des ciments CPJ aux différents ajouts :

Ce paramètre peut modifier considérablement la réactivité des ciments, mais il est difficile de comprendre son origine. Cela peut provenir de la qualité et de la granulométrie de l'ajout utilisé ou du broyage [92].

La surface Blaine du ciment portland produit par la cimenterie de Saida est de 357,6m²/kg (tableau IV.6). Cette valeur correspond au SSB du CEMI (300-500m²/Kg). Les surfaces SSB des ciments avec addition calcaire sont globalement plus élevées que celles du ciment portland. La surface Blaine SSB du ciment ajout déchet céramique est légèrement plus faible que celle du ciment Portland dû à la finesse du liant qui est moyenne. Ce résultat ne peut traduire qu'une faible porosité du matériau. Le ciment avec ajout déchet céramique devrait donc demander moins d'eau que le ciment avec ajout calcaire. Les ciments avec ajout calcaire présentent une surface Blaine plus élevée que celle du ciment Portland. Cela ne peut être

attribué qu'à la porosité ouverte du calcaire. Il faut savoir qu'une surface Blaine de 400m²/kg permet une bonne réactivité [93].

Tableau IV.6 : Surface spécifique Blaine (SSB) des ciments CPJ élaborés.

		ajout (%)				
	Nature ajout	0	10	13	15	20
SSB ciment (cm ² /g)	calcaire	3576	4198	4274	4305	4730
	céramique	3576	3506	3437	3502	3522

La surface spécifique des matériaux augmente la demande en eau du ciment préparé en modifiant les interactions électrostatiques des particules en suspension. SSB est associée à une diminution de la granulométrie. On peut donc s'attendre à un faible impact positif de l'ajout déchet céramique sur les propriétés de la pâte ciment lorsqu'elle est introduite dans un ciment. La surface spécifique impacte également leur réactivité. Une plus grande finesse implique une meilleure réactivité, apportant de meilleures performances aux ciments.

IV.6- Caractérisation des pâtes de ciments confectionnés :

Les pâtes des différents ciments ont été préparées dans le but de déterminer le besoin en eau pour une consistance normale et les délais de prise. Cette caractérisation permet de suivre l'évolution de la structuration de la pâte de ciment et notamment sa prise, comprise entre deux échéances : les temps de début et de fin de prise.

IV.6.1-Consistance normale des pâtes de ciments CPJ élaborés :

La détermination de la consistance normale, permet de connaître l'effet de la nature de l'ajout utilisé et de son taux d'incorporation sur la pâte de ciment. A partir des résultats obtenus (tableau IV.7), nous pouvons fixer la quantité d'eau de gâchage pour confectionner les mortiers de cette étude.

La demande en eau des ciments élaborés présente des différences importantes, notamment entre les ciments aux différents ajouts. Les CEM II déchet céramique ont une demande en eau plus faible que celle du CEM I. Ceci peut être attribué à leur finesse qui est reliée à la compacité, voire aussi à la probable absorption d'eau du filler utilisé.

Tableau IV.7 : Consistance normale des ciments CPJ élaborés.

Ajout (%)	Consommation d'Eau (ml/500g Ciment)		Consistance (%)		E/C	
	Calcaire	Céramique	Calcaire	Céramique	Calcaire	Céramique
0	113	113	22,6	22,6	0,226	0,226
10	121	111	24,2	22,2	0,242	0,222
13	111	110	22,2	22	0,222	0,22
15	117	109	23,4	21,8	0,234	0,218
20	137	138	27,4	27,6	0,274	0,276

Le ciment CEM II (20% ajout) présente une demande en eau plus élevée, alors qu'il n'est pas plus fin. Ce comportement peut dépendre de la quantité du régulateur de prise [94].

Selon la figure IV.1, il est clair que l'utilisation du calcaire comme filler augmente la demande en eau pour l'obtention d'une pâte consistante. Alors que le déchet céramique réduit la quantité d'eau requise, ceci peut être dû à la structure du déchet utilisé [95].

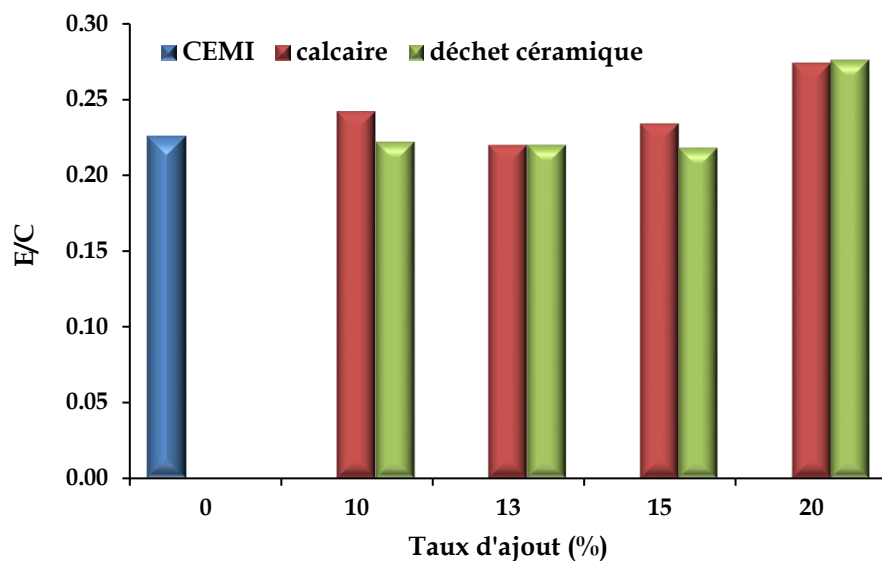


Figure IV.1 : Evolution du rapport E/C en fonction du taux d'ajout des différentes additions cimentaires

Plus nous substituons le ciment portland par du calcaire, plus la demande en eau est élevée. Ceci est dû probablement à la grande surface spécifique présentée par le mélange et donc un fort appel aux molécules d'eau afin de mouiller toute la surface est constaté [96].

La granulométrie du liant peut avoir un impact sur la demande en eau des mélanges. Une granulométrie fine augmente le volume d'eau nécessaire à disperser les particules fines alors qu'une granulométrie moyenne le diminue. En effet, l'eau doit remplir les vides inters granulaires. Le volume de ces vides peut diminuer avec l'utilisation d'un filler. Toutefois, l'utilisation de filler de grande surface spécifique ou de grande porosité peut limiter l'effet associé à l'empilement granulaire, à cause d'une adsorption voire d'une absorption d'eau supérieure. Il peut ainsi y avoir compétition entre la demande en eau associée à la granulométrie et la demande en eau liée à l'adsorption ou l'absorption d'eau [97]. Le même constat a été effectué par [98]. Pour un taux d'ajout de 20%, la demande en eau est la plus élevée quelque soit l'addition cimentaire utilisée.

IV.6.2-Expansion des ciments CPJ élaborés :

Les pâtes de mortiers gonflent en présence de l'humidité ou dans l'eau selon différents facteurs entre autre la nature des ajouts qui peuvent être expansifs.

Les valeurs de l'expansion des pâtes des différents mortiers préparés, montrent que la norme de stabilité de la pâte est respectée (<10mm). Seulement, il est à noter que le déchet céramique introduit comme ajout augmente la valeur de gonflement de la pâte.

Tableau IV.8 : Expansion des ciments CPJ avec ajout calcaire

		CPJ ajout (%)				
Expansion (mm)	Nature ajout	0	10	13	15	20
	Calcaire	0,5	0,6	0,9	1	1,1
	Céramique	0,5	2,0	2,7	2,8	1,0

IV.6.3-Temps de prise :

Le début de prise du ciment portland produit par la cimenterie de Saida a lieu à partir de 113mn et se termine après 179mn. Cependant les ciments avec ajout confectionnés développent des temps du début et de fin supérieurs à ceux du ciment témoin.

La figure IV.2 montre que le temps de prise varie proportionnellement au pourcentage des fillers calcaire. La réduction de la finesse du ciment en incorporant plus de filler calcaire augmente le temps de prise pour l'ensemble des mélanges étudiés. Cette augmentation est due à l'accélération des réactions de l'hydratation du ciment.

Tableau IV.9 : Temps de prise des ciments CPJ avec ajout calcaire :

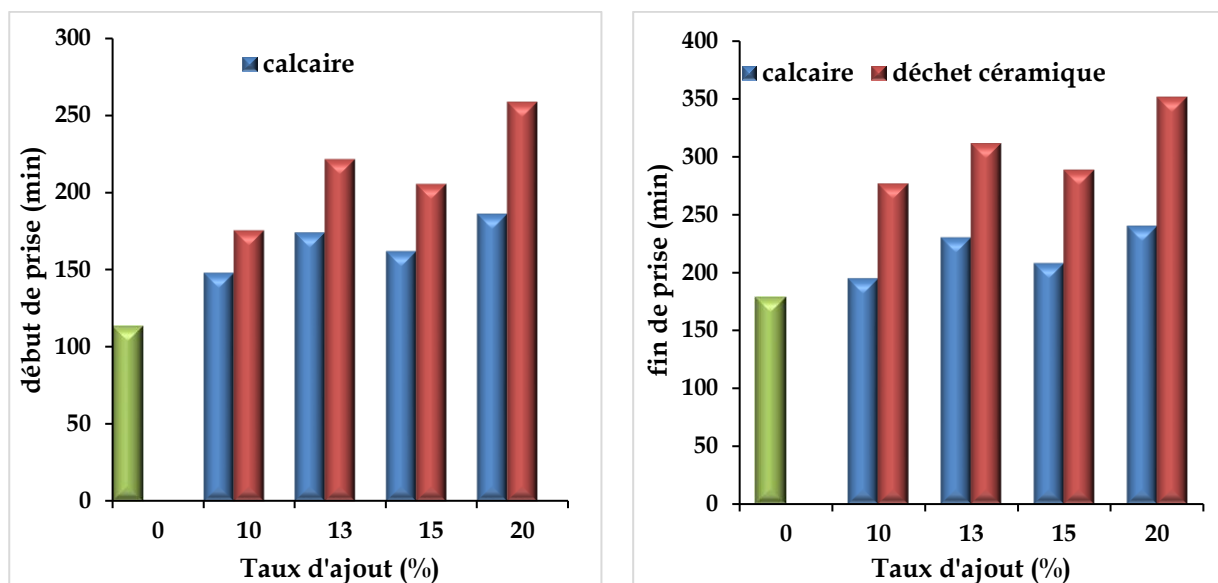
CPJ ajout calcaire (%)		0	10	13	15	20
Temps de prise (min)	Début de prise	113	148	174	162	186
	Fin de prise	179	195	230	208	240

Tableau IV. 10 : Temps de prise des ciments CPJ avec ajout céramique :

CPJ ajout céramique (%)		0	10	13	15	20
Temps de prise (min)	Début de prise	113	176	222	206	259
	Fin de prise	179	277	312	289	352

Nous remarquons que les temps de début et de fin de prise augmentent proportionnellement avec l'augmentation de la quantité d'ajout que ce soit calcaire ou déchet céramique (tableaux IV.9 et IV.10) Cela s'explique par le fait que la réaction chimique est retardée à court terme. Ce qui veut dire aussi que la cinétique d'hydratation du liant devient de plus en plus lente en fonction de l'augmentation du taux de substitution. Par conséquent les cristaux de CSH (élément responsable du phénomène de durcissement de la pâte) existent uniquement en faible quantité aux très jeunes âges [99].

Le déchet céramique affaiblit encore plus la cinétique d'hydratation comparé au calcaire (figure IV.2).



FigureIV.2 : Evolution du temps de prise en fonction du taux d'ajout des différentes additions cimentaires

Le temps de début et fin de prise est plutôt variable sans lien avec la nature du ciment.

Selon les normes ASTM C595 et C1157, la limite inférieure du temps de prise est de 45min alors que la limite supérieure est de 420min. Les résultats démontrent que le temps de prise de tous les échantillons confectionnés, répond aux normes en rigueur.

Les résultats révèlent aussi que les temps de prise augmentent légèrement lorsque le taux d'ajout est de plus en plus élevé.

IV.7-Propriétés mécaniques des Mortiers élaborés :

Les propriétés mécaniques des mortiers à base de ciments CPA et CPJ aux différents ajouts cimentaires ont été déterminées.

IV.7.1-Résistances mécaniques des mortiers CPJ calcaire :

Les résistances mécaniques des ciments CPJ calcaire sont disposées sur le tableau IV.11. Les mortiers avec additions calcaire développent des résistances à 28 jours supérieures à la valeur de la résistance minimale (40MPa) requise pour un ciment classe CEMII/A. Aux échéances de 2jourset 7jours ; le mortier à 20% calcaire présente une meilleure résistance à la compression que celle du ciment portland. Tous les mortiers confectionnés avec le filler calcaire montrent une résistance au jeune âge très appréciable.

Tableau IV.11 : Résistances mécaniques des ciments CPJ avec ajout calcaire

ajout calcaire (%)	Résistances mécaniques (MPa)					
	A la Flexion			A la Compression		
	2J	7J	28J	2J	7J	28J
0	3,86	6,37	6,41	19,21	40,26	49,76
10	4,07	6,54	7,12	21,12	37,21	43,44
13	4,09	6,41	7,01	20,60	38,04	43,25
15	3,89	6,09	6,50	19,70	35,41	41,25
20	4,40	6,45	6,95	24,18	41,13	43,07

Les résultats montrent clairement (Figure IV.3) que la résistance mécanique des ciments avec ajouts évoluent positivement avec le temps. Le taux de 10% d'ajout présente les meilleures résistances mécaniques enregistrées.

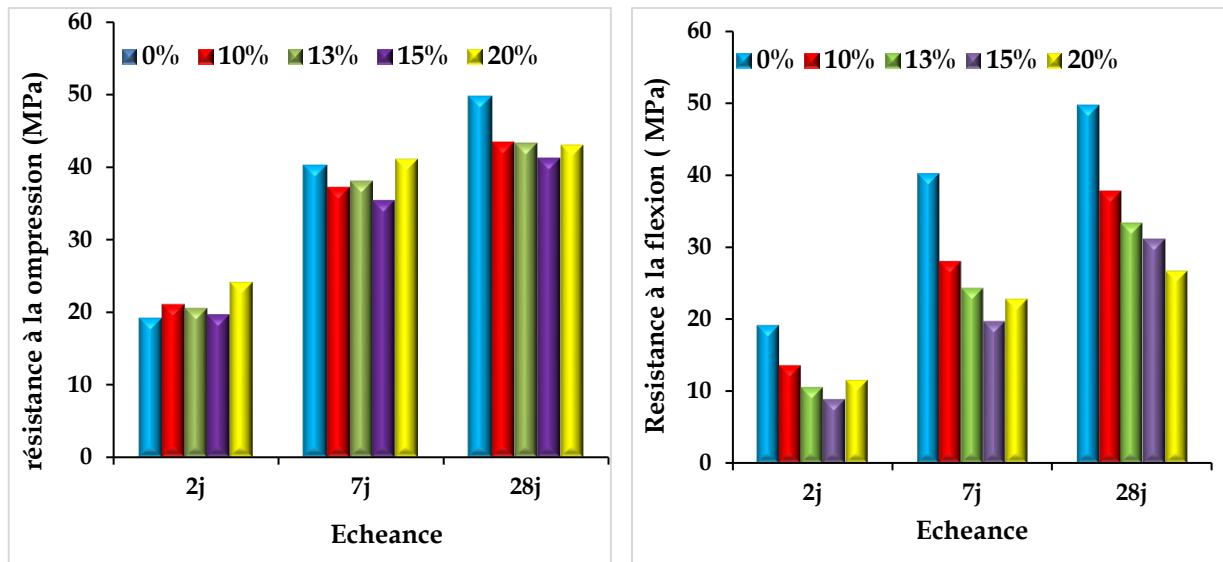


Figure IV.3 : Résistances mécaniques des ciments CPJ calcaire aux différentes échéances

L'exploitation des graphes de la figure IV.3 montre que les mortiers de calcaire développent des résistances à la compression au jeune et moyen âge contrairement à la résistance à la flexion. Pour un taux de 15% de substitution, les résistances restent faibles quelque soit l'échéance.

Le développement des résistances est dû à la cinétique de la réaction d'hydratation des constituants de ciment au calcaire. Autant que l'hydratation se poursuit, plus les produits d'hydratation, sont formés (notamment la formation des hydrosilicates de calcium CSH), lesquels conduisent à une augmentation dans les résistances mécaniques. [100]

Les résistances sont améliorées au jeune âge. L'amélioration des résistances au jeune âge indépendamment de l'effet remplisseur est due à la nucléation hétérogène qui produit un excès d'hydrate formé [101]. La réaction entre l'eau et le ciment est plus rapide en présence du filler calcaire. Il a été démontré que l'effet de la finesse est bénéfique pour les surfaces spécifiques en dessous de 500kg/m^2 [102].

IV.7.2-Résistances mécaniques des mortiers CPJ déchet céramique :

A partir des résultats obtenus (tableau IV.12), nous constatons que la résistance à la flexion diminue légèrement entre 2 et 7 jours en fonction du taux d'ajout. À très court et moyen termes, le mortier à base 10% céramiques présente une résistance à la flexion plus élevée, comparée à celle des autres ciments CPJ céramique.

Tableau IV.12 : Résistances mécaniques des ciments CPJ avec ajout céramique

CPJ ajout céramique (%)	Résistance mécanique (MPa)					
	Flexion			Compression		
	2J	7J	28J	2J	7J	28J
0	3,86	6,37	6,41	19,21	40,26	49,76
10	3,4	4,82	5,79	13,60	28,01	37,76
13	2,53	4,52	5,45	10,53	24,23	33,30
15	2,33	4,32	5,44	8,89	19,71	31,16
20	2,68	4,50	4,99	11,60	22,82	26,70

D'après la figure IV.4, la résistance à la compression des mortiers diminue au fur et à mesure que le taux de substitution par le déchet céramique augmente quelque soit l'âge des mortiers. Les résistances mécaniques restent inférieures à celle du témoin.

Cette perte de résistance est due à l'absence de l'activité pouzzolanique du granulat déchet céramique. Cet ajout ne consomme pas la portlandite produite par l'hydratation du ciment. Nous pouvons aussi avancer que sa surface spécifique ne permet pas d'avoir l'effet filler entre les grains du ciment, ce qui rend la pâte moins compacte.

Les valeurs des résistances à la compression à 2 et 7 jours, dépassent largement le minimum requis selon la norme ASTM C1157 soit 10 et 17MPa respectivement, pour les ciments hydrauliques.

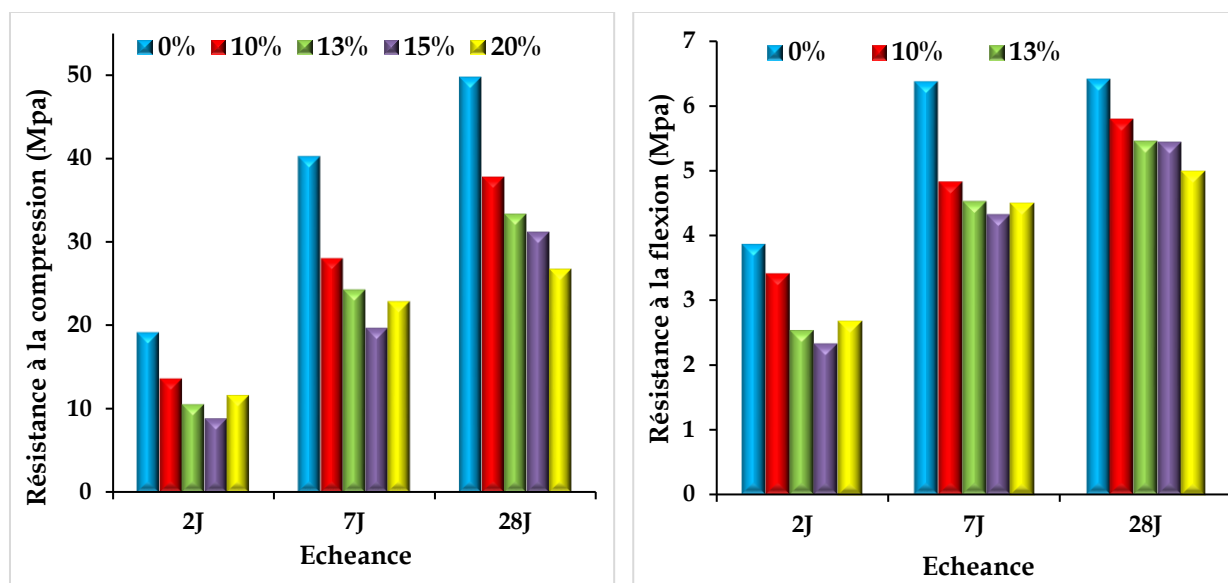


Figure IV.4 : Résistances mécaniques des ciments CPJ déchet céramique aux différentes échéances

La résistance à la compression des éprouvettes suit les mêmes tendances. À très court terme, les éprouvettes contenant le ciment 10% déchet céramique ont une résistance plus élevée (13.60MPa à 2 jours) que celles contenant plus de déchet céramique. À partir de 7 jours, les performances ont tendance à augmenter.

Le déchet céramique est une addition qui ne contribue pas au développement des résistances des mortiers.

Tant que l'hydratation se poursuit, les produits d'hydratation ont du mal à se former, notamment la non formation des hydrosilicates de calcium produit des réactions pouzzolaniques, lesquels conduisent à une augmentation dans la résistance mécanique.

IV.8-Conclusion

- Le co-broyage des ajouts et du clinker influe sur la finesse du ciment CPJ obtenu et ainsi sur ses propriétés.
- L'incorporation de la céramique contribue à la diminution de la finesse des ciments confectionnés.
- Les ciments contenant du calcaire développent des résistances appréciables à court terme. Par contre l'introduction du déchet céramique dans la matrice cimentière provoque l'effet inverse.
- La demande en eau du CPJ calcaire est plus élevée que celle du ciment portland mais comparé à celle du ciment au déchet céramique, elle est plus basse.
- Cette partie de l'étude montre que l'incorporation progressive du déchet céramique à granulométrie 5-10 mm entraîne une diminution des résistances mécaniques.
- La nature de l'ajout influe sur les propriétés des mortiers ainsi que le taux de substitution. Le calcaire reste le filler le plus efficace et le plus économique.
- Le taux de 10% de substitution présente les meilleures performances physiques.
- Le comportement divergent entre l'ajout calcaire et le déchet céramique indique que le calcaire montre une plus grande affinité de surface pour la nucléation et la croissance des hydrates de ciment. Une observation qui a été reporté par différentes études [103, 104].
- Les différentes substitutions utilisées par la cimenterie de Saida ces dernières années (tableau IV.13) montrent que l'efficacité des additions cimentaires ne se base pas seulement sur l'activité du matériau mais nous pouvons avancer que la finesse et la broyabilité sont des paramètres à prendre en considération.

Tableau IV.13 : Résistances mécaniques des ciments CPJ produits par la SCIS Saida au cours de la dernière décennie

Année	Nature de l'ajout	Taux de substitution (%)	Résistances à la compression (MPa)		
			2J	7J	28J
2010	Calcaire	13	17,08	31,46	42,56
2012	(calcaire+pouzolanne)	16	12,70	30,05	46,04
2013	Pouzolanne	20	18,31	33,64	43,46
2014	(calcaire+pouzolanne)	16	19,35	33,60	43,62
2017	(calcaire+pouzolanne)	15	10,36	31,49	42,84
2018	(calcaire+pouzolanne)	17	22,30	30,68	45,86

CHAPITRE V

D

**URABILITE DES
MORTIERS
ELABORES**

V.1-Introduction

La durabilité est définie comme la résistance du ciment aux agressions internes ou externes du milieu environnant.

Les sulfates peuvent causer de graves dommages aux structures en béton [105, 106]. La réaction des sulfates avec les composants du ciment engendre des composés plus volumineux, provoquant une expansion, une rupture et enfin une fissuration des mortiers [107]. Il a été démontré que les additions cimentaires améliorent la résistance aux sulfates du ciment Portland [108].

Dans cette dernière partie de notre travail, nous étudions l'évolution du ciment portland fabriqué par la cimenterie de Saida dans un milieu aqueux et dans un milieu acide ainsi que les ciments CPJ élaborés. Nous avons choisi les CPJ qui ont donné la meilleure résistance à la compression à long terme soit les CPJ 10% calcaire et 10% ajout déchet céramique.

V.2-Lessivage du déchet de céramique :

Afin de bien cerner l'influence du milieu sur le ciment CPJ déchet de céramique, nous avons étudié en premier lieu le lessivage du déchet.

Le tableau V.1 englobe l'évolution de la conductivité et du pH du milieu d'immersion au cours de la période de lessivage par une eau distillée de pH=6,4 et de conductivité électrique = 0mS.

Tableau V.1 : Evolution de la conductivité et du pH du milieu d'immersion au cours de la période de lessivage du déchet céramique.

Durée d'immersion (jours)										
	1	2	3	6	7	12	13	14	22	24
Conductivité (mS)	0,21	0,27	0,52	0,65	0,70	1,10	1,14	1,50	0,90	0,83
pH	6,00	6,70	7,97	7,64	7,47	8,20	7,87	8,20	8,40	8,24

Le pH du milieu ainsi que sa conductivité augmentent au fur et à mesure que nous allongeons la période d'immersion du déchet de céramique dans l'eau (figures V.1). Nous pouvons avancer que les ions migrent du déchet vers le milieu extérieur. Le pH indique un milieu qui tend de plus en plus vers un milieu basique. Ceci peut être dû aux ions de calcium qui diffusent vers le milieu extérieur.

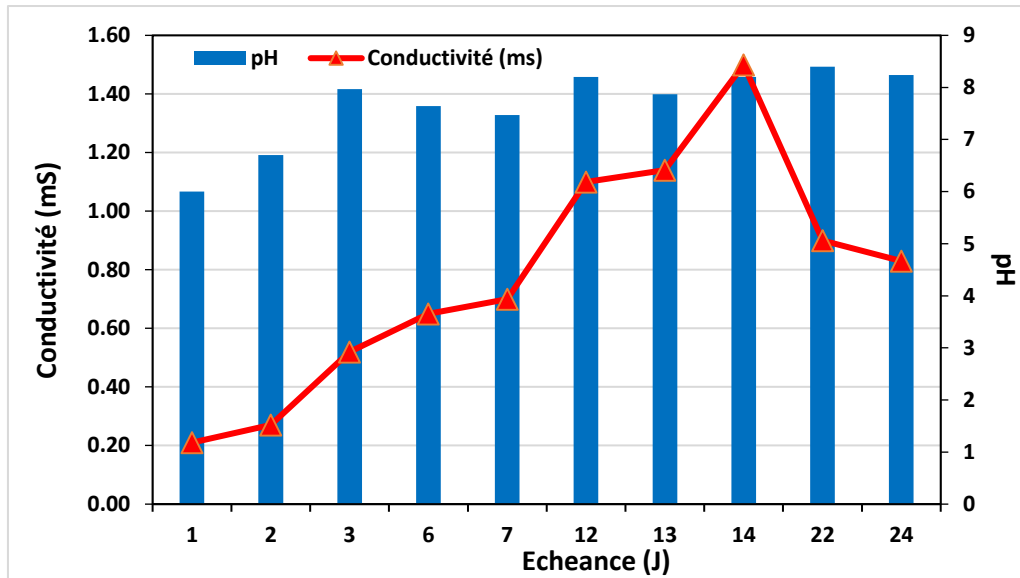


Figure V.1 : Evolution de la conductivité et du pH du milieu d'immersion du déchet céramique en fonction de l'échéance du lessivage.

V.3-Lixiviation des ciments élaborés :

Les éprouvettes d'échéance 28j, du CEMI ainsi que celles des CPJ10%calcaire et CPJ10% déchet céramique, ont été immergées dans de l'eau distillée afin d'étudier le langage des espèces dans le milieu extérieur. L'évolution du pH et de la conductivité du milieu d'immersion ont été suivis tout le long de la période de lixiviation.

Aucune transformation de l'aspect visuel n'a été enregistrée à l'œil nu, tout le long de la période d'immersion (figure V.2).

Sur le tableau V.2, nous reportons l'évolution de la conductivité du milieu au cours de la période de lixiviation des mortiers : Ciment portland et des CPJ aux différentes additions cimentaires.



1 : CPJ10% calcaire, 2 : CEMI, 3 : CP J10% déchet de céramique

Figure V.2 : éprouvettes des ciments élaborés après 27j d'immersion dans l'eau distillée.

Tableau V.2 : Evolution de la conductivité du milieu d'immersion des ciments élaborés en fonction de l'échéance du lessivage.

		Durée d'immersion (jours)									
Conductivité (mS)		1	2	3	6	7	12	13	14	22	24
	CEMI	0,04	0,38	0,65	0,80	0,61	0,60	0,56	0,60	0,50	0,50
	CPJ calc	0,04	0,24	0,49	0,60	0,44	0,30	0,41	0,30	0,20	0,22
	CPJ céram	0,03	0,20	0,43	0,50	0,43	0,40	0,40	0,30	0,30	0,21

Calc : 10% calcaire, céram : 10% déchet céramique

Suivant la figure V.3, la conductivité du milieu de lixiviation des différentes éprouvettes étudiées au cours de la période de lixiviation augmente par rapport à la conductivité de l'eau utilisée. La conductivité du milieu d'immersion des CPJ aux différents ajouts est plus faible que celle du Ciment Portland. Ce résultat démontre que la diffusivité des éléments ioniques du ciment portland est plus élevée que celle des CEMII. La cinétique de diffusion des éléments ioniques des ciments CPJ est la même quelque soit la nature de l'ajout. Nous pouvons avancer que les additions minérales diminuent la diffusion des ions. Ceci est dû à la faible porosité des ciments CPJ. En effet, la porosité capillaire des CPJ est plus faible que celle du ciment portland. Les ajouts diminuent la quantité de portlandite dans la matrice cimentière vu que la

quantité de clinker est plus faible. La lixiviation de la portlandite augmente la concentration ionique dans le milieu aqueux. [109]

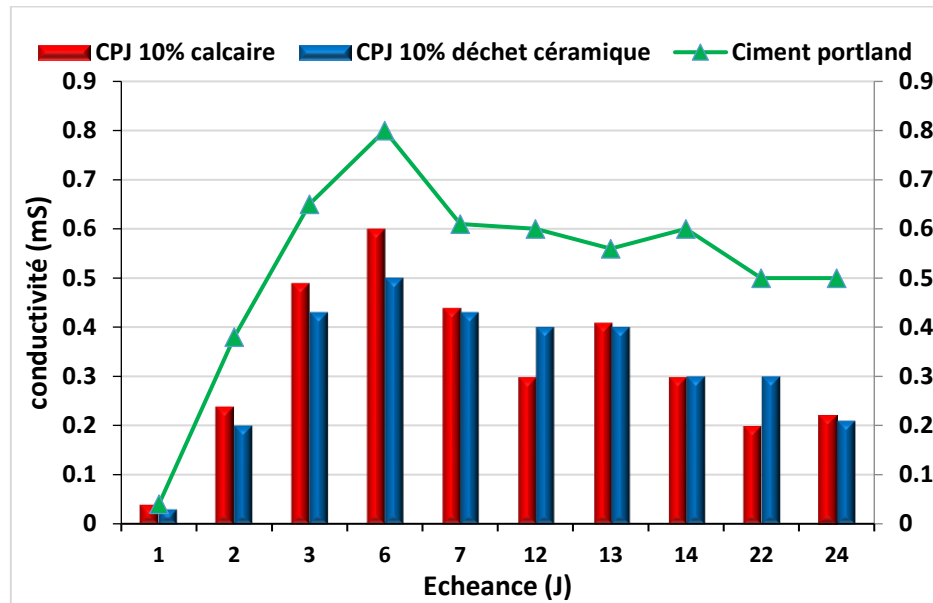


Figure V.3 : Evolution de la conductivité du milieu d'immersion des ciments élaborés en fonction de l'échéance du lessivage.

Les valeurs du pH du milieu de lixiviation des différentes éprouvettes étudiées au cours des différentes échéances, sont regroupées dans le tableau V.3. L'alcalinité de tous les milieux devient fortement basique dès les premiers jours de lixiviation.

L'immersion des éprouvettes de ciment dans l'eau augmente le pH du milieu quelle que soit la nature du ciment et de l'ajout (figure V.4).

Tableau V.3 : Evolution du pH du milieu d'immersion des ciments élaborés en fonction de l'échéance du lessivage.

		Durée d'immersion (jours)											
		1	2	3	6	7	8	9	12	13	14	22	24
pH	CEMI	6	12,16	11,34	11,46	11,43	11,51	11,60	11,30	11,37	11,37	11,25	11,10
	CPJ calc	6	11,82	10,99	11,33	11,27	11,28	11,15	11,01	10,65	10,88	10,27	10,67
	CPJ céram	6	11,57	10,93	11,25	11,22	11,23	11,12	11,14	11,15	11,12	10,81	10,14

Le milieu de lixiviation du ciment portland est le plus basique quelque soit la durée de lixiviation. Les valeurs du pH sont supérieures à 10. Nous notons une diminution du pH à 3 jours de lixiviation.

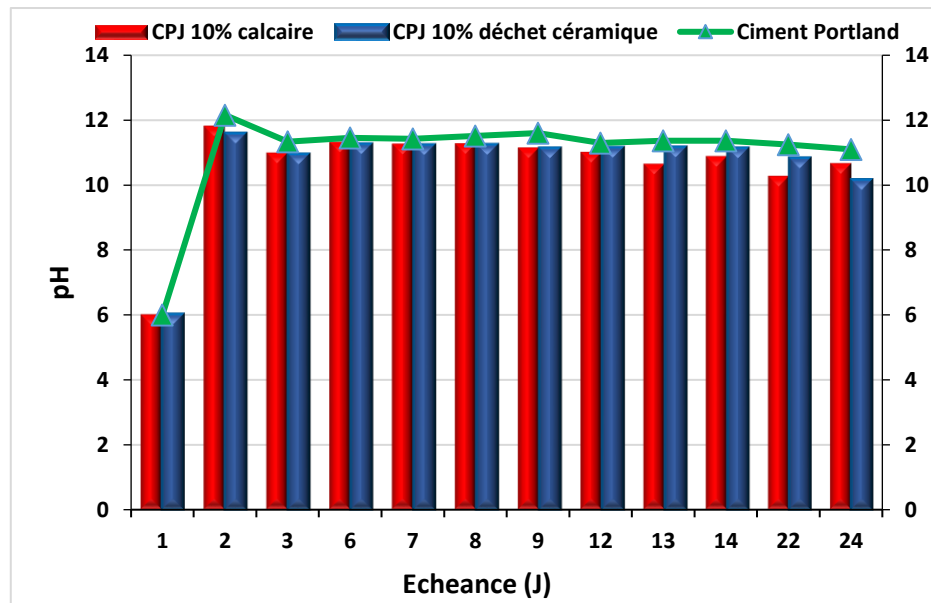


Figure V.4 : Evolution du pH du milieu d'immersion des ciments élaborés en fonction de l'échéance du lessivage.

V.4-Durabilité des ciments élaborés dans un milieu acide :

Les éprouvettes de ciment portland et de ciments CPJ aux différents ajouts, de dimension 40X40X160mm, après démoulage, ont été immergées dans une solution riche en chaux pendant 27 jours. Des bulles d'air sur la surface de la solution ont été observées. Un précipité blanc se forme au fil du temps (figure V.5).

Une couche blanchâtre se forme sur la surface externe des éprouvettes des différents ciments élaborés après une cure de 27 jours dans une solution saturée de chaux (figure V.6).

Après 28 jours de cure sous l'eau saturée en chaux, les échantillons sont immergés dans un milieu acide (5% acide sulfurique).

Le milieu acide prend une couleur marron après l'écoulement d'un quart d'heure d'immersion des éprouvettes des différents ciments élaborés (figure V.7).

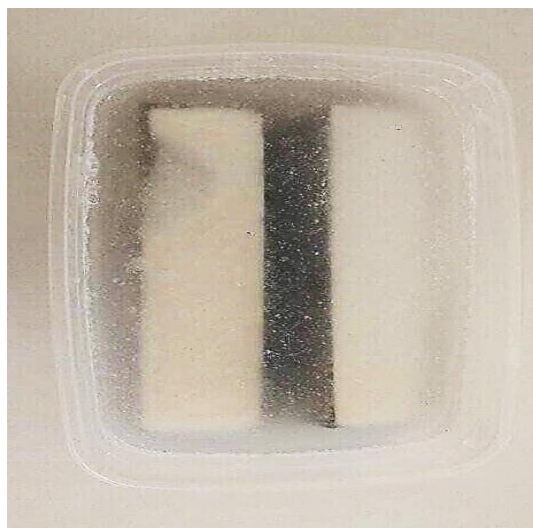
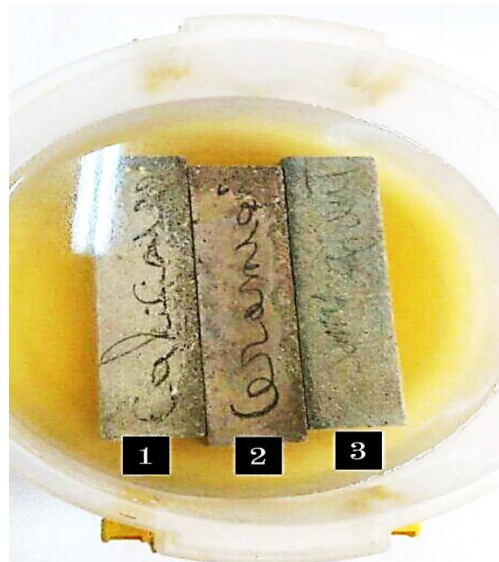


Figure V.5 : éprouvettes CPJ dans l'eau saturée en chaux après 27 jours d'immersion.



Éprouvette CPJ 10% calcaire Éprouvette CPJ 10% céramique Éprouvette Ciment portland

Figure V.6 : éprouvettes après 27 jours d'immersion dans la solution de chaux saturée.



1 : CPJ 10% calcaire, 2 : CP J10% ajout déchet céramique, 3 : CEMI

Figure V.7 : apparence du milieu acide après 15 mn d’immersion des éprouvettes.

L’évolution de la masse des éprouvettes au cours du temps d’immersion dans le milieu acide est exposée dans le tableau V.4

Tableau V.4 : Evolution de la masse des mortiers au cours des différentes échéances dans le milieu acide.

		Echéance (jours)						
		0	2	4	6	12	20	27
Masse (g)	CEMI	581	581	580	580	579	575	572
	CPJ 10% calc	576	576	575	575	574	569	559
	CPJ 10% céram	565	565	564	563	561	561	561

Afin de bien cerner le phénomène d’érosion des éprouvettes, nous avons étudié l’évolution de la perte de masse PE des différentes éprouvettes au cours de la période d’immersion dans le milieu acide (figure V.8).

La perte de masse PE a été calculée selon l’expression suivante :

$$PE (\%) = \frac{Ma - Me}{Ma} \cdot 100 \dots\dots\dots (V.1)$$

Où

Ma : masse éprouvette avant immersion

Me : masse éprouvette essuyée après immersion

La perte de masse observée pour l'ensemble des mortiers est due au fait que le ciment, après hydratation, libère une partie considérable d'hydroxyde de calcium libre $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ qui peut être lixiviée à l'extérieur quand elle est soumise à l'attaque par l'acide sulfurique $[\text{H}_2\text{SO}_4]$ en donnant du sulfate de calcium qui cause la dégradation de l'éprouvette.

Cette perte de masse est visible sur la surface externe des éprouvettes par la formation de cavités.

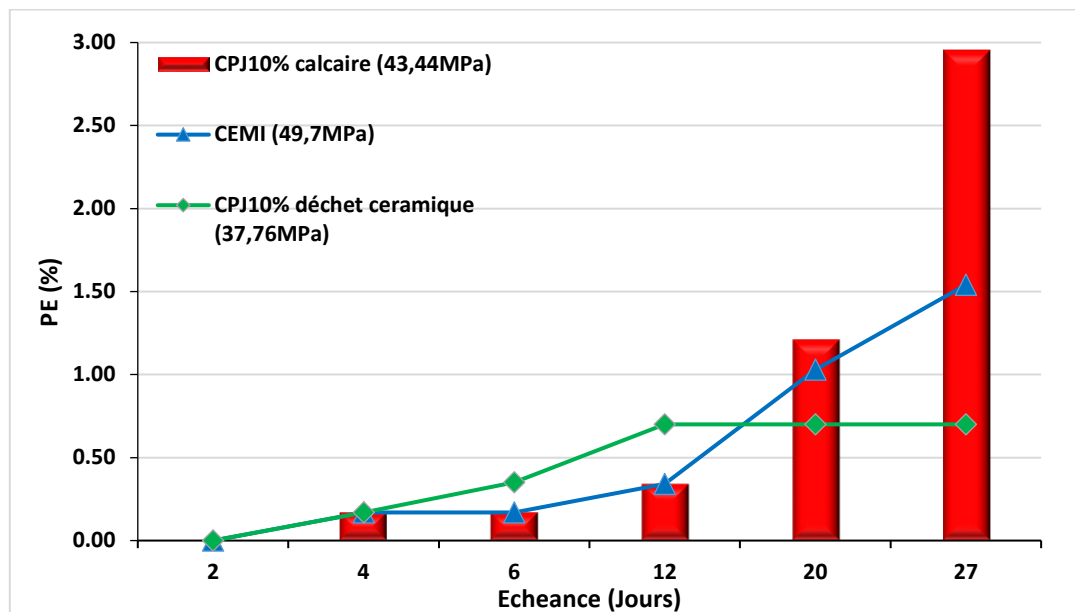


Figure V.8 : Evolution de la perte de masse des éprouvettes des ciments élaborés au cours des différentes échéances d'immersion dans le milieu acide.

Nous constatons que la perte de masse du CPJ 10% calcaire est plus importante que celles des autres éprouvettes. Le ciment aux ajouts déchet céramique présente la plus faible perte de masse. Nous pouvons avancer que la diminution de la porosité de la pâte de ciment durci, freine la pénétration des agents agressifs [110].

Nous pouvons aussi remarquer que la résistance mécanique n'est pas un facteur de prévention contre l'érosion du ciment dans le milieu acide, puisque le CEMI présente une perte de masse plus élevée que celle du ciment au déchet céramique bien que sa résistance mécanique est plus élevée. Le déchet céramique procure une matrice cimentaire plus compacte qui résiste à la diffusion des ions à l'interface [111].

V.4.1-Inspection visuelle de la surface externe des éprouvettes de ciments élaborés immergées dans un milieu acide

L'aspect macroscopique des différentes éprouvettes de ciments élaborés immergées dans un milieu acide est exposé dans la figure V.9

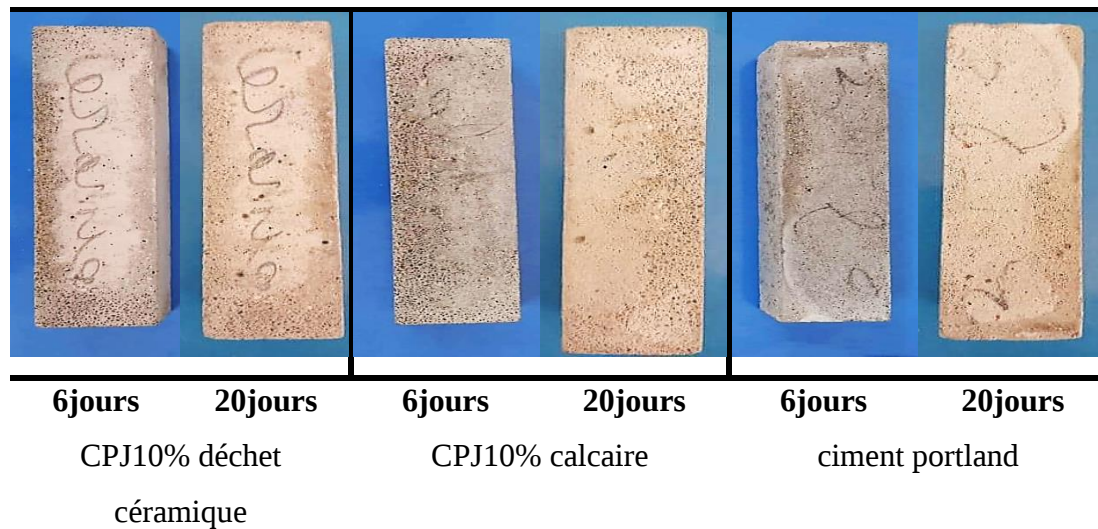


Figure V.9 : Aspect visuel des éprouvettes des différents ciments élaborés immergées dans un milieu acide.

Les éprouvettes ont un aspect dégradé au fur et à mesure que l'échéance de l'immersion dans un milieu agressif. La formation de cavités sur la surface externe est notée. Ceci peut être dû à l'agression de la surface par les sulfates. Le ciment CPJ 10% calcaire est le plus endommagé. Sa surface externe présente plus de cavités que les autres éprouvettes. Ceci est dû au phénomène diffusif. En effet, la phase interstitielle contenue dans la matrice a un pH basique. Au contact d'un milieu de pH plus faible, la pâte de ciment se trouve en déséquilibre avec ce milieu extérieur. Il y a alors une lixiviation progressive des hydrates se traduisant par une décalcification de la pâte, par la dissolution de la portlandite et enfin par une attaque progressive des gels CSH.

V.5-Durabilité des ciments élaborés dans un milieu naturel :

Les éprouvettes des différents ciments élaborés ont été immergées dans de l'eau du robinet (figure V.10) afin d'étudier la durabilité de ces mortiers dans un milieu aqueux naturel pour une période de 27 jours. Le pH de l'eau du robinet a été estimé à $\text{pH}=7,41$ avec une conductivité de 2,6 ms.



Figure V.10 : immersion des mortiers des différents ciments élaborés dans l'eau de robinet.

Les dimensions des éprouvettes ont été mesurées avant et après immersion dans l'eau du robinet (tableau V.5) afin de suivre l'expansion des éprouvettes en calculant le retrait par l'équation suivante .:

$$\Delta L = \frac{Li - Lf}{Li} \cdot 100\% \dots\dots\dots (V.2)$$

Où

Li : dimension (longueur) avant immersion dans le milieu aqueux

Lf : dimension après immersion dans le milieu aqueux

Tableau V.5 : Evolution des dimensions des mortiers de ciments élaborés immergés dans un milieu naturel pendant 27j.

Dimension	Li (mm)	Lf (mm)	ΔL (%)
Ciment Portland	160	160	0
CPJ 10% calcaire	160	160	0
CPJ 10% déchet de céramique	160	160	0

Aucun retrait n'a été enregistré quelque soit la nature du ciment utilisé pour élaborer les mortiers immergés dans l'eau du robinet (tableau V.5). Nous avons reporté sur le tableau seulement la dimension longueur de l'éprouvette mais le même constat a été reporté pour les autres dimensions.

V.6-Conclusion

Les conclusions que nous pouvons tirer de cette expérimentation sont les suivantes :

- La nature des additions cimentaires influent sur la durabilité de la matrice cimentière dans un milieu acide.
- La perte de masse des mortiers CPJ 10% calcaire dans le milieu acide est plus importante que celle des autres mortiers.
- L'aspect visuel des mortiers immergés dans le milieu acide démontre que le milieu acide crée des cavités sur leur surface externe.
- La durabilité de mortiers dans un milieu acide est indépendante des propriétés mécaniques des ciments utilisés
- Le déchet céramique utilisé comme addition cimentaire diminue 'effet du milieu acide sur les mortiers.
- Le lessivage des mortiers CPJ donne lieu à un milieu plus basique que celui du milieu d'immersion du ciment portland.
- Les mortiers immergés dans l'eau du robinet ne présentent aucune expansion quelque soit la nature du ciment utilisé après une échéance de 27jours.

CONCLUSION GENERALE

Nous nous sommes fixées comme objectif pour cette présente étude : la caractérisation des ciments élaborés à partir du cru de la cimenterie de Saida.

Afin de répondre à cette problématique, nous avons en premier lieu caractérisé les matières premières utilisées par la SCI-Saida. Par la suite, nous avons déterminé les modules industriels du cru préparé. Le deuxième volet était de choisir des additions cimentaires afin de réduire le taux de clinker dans le ciment et d'améliorer les propriétés des CPJ produits dans un but économique. Notre choix s'est porté sur le calcaire, un ajout utilisé actuellement par la cimenterie et un déchet de démolition : déchet céramique afin de contribuer au recyclage des rebus de construction sachant que la wilaya de Saida englobe une importante industrie des céramiques. Enfin pour parfaire cette étude, nous nous sommes intéressées à la durabilité des CPJ élaborés dans un milieu acide et dans un milieu naturel.

Les résultats obtenus dans cette étude expérimentale nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

- L'exploitation de la carrière argile par la cimenterie de Saida au cours de ces dernières années a révélé l'extraction d'une argile riche en alcalis, ce qui est néfaste à la synthèse du clinker.
- La nature géologique des carrières (chimie des matières premières) peut influencer dans l'avenir encore plus sur la composition du cru de la cimenterie de Saida., notamment la carrière d'argile.
- Le sable utilisé comme correcteur présente une finesse élevée.
- Le clinker produit est riche en alite, ce qui révèle une matrice cimentaire très active permettant d'effectuer des substitutions importantes sans avoir un effet de dilution.
- La composition élémentaire des additions est majoritairement basée sur le système SiO_2 , Al_2O_3 , CaO . Le déchet céramique proposé dans cette étude présente un taux d'adsorption d'eau élevé et une densité plus légère que celle du calcaire et du clinker.
- Le co-broyage des ajouts et du clinker influe sur la finesse du ciment CPJ obtenu et delà sur ses propriétés.
- L'incorporation du déchet de céramique contribue à la diminution de la finesse des ciments confectionnés.
- Les ciments contenant du calcaire développent des résistances appréciables à court terme. Par contre, l'introduction du déchet céramique dans la matrice cimentière provoque l'effet inverse.

-L'incorporation progressive du déchet céramique à granulométrie 5-10 mm entraîne une diminution des résistances mécaniques.

-Le calcaire reste le filler le plus efficace et le plus économique.

-Le taux de 10% de substitution présente les meilleures performances physiques.

-Selon nos investigations, nous pouvons avancer que la finesse et la broyabilité sont des paramètres à prendre en considération dans la conception des ciments CPJ.

-Le ciment portland de Saida montre une résistance non négligeable au milieu acide.

-Le lessivage des mortiers CPJ donne lieu à un milieu plus basique que celui du milieu d'immersion du ciment portland.

-Les différents ciments CPJ élaborés avec la matrice cimentaire de la SCI-Saida ne présentent aucune expansion lors de leur immersion dans l'eau du robinet.

En résumé, ces résultats sont prometteurs pour la cimenterie de Saida. Le CEMI produit présente des caractéristiques performantes. Le calcaire extrait de la carrière mitoyenne à l'unité de production présente un très bon filler pour l'élaboration d'un ciment CPJ à 10% de substitution. Le déchet céramique promet une très bonne perspective pour la production d'un ciment résistant aux sulfates. Ce type de ciment peut être amélioré en utilisant une finesse plus poussée des déchets céramiques. Une perspective à explorer dans les travaux futurs.

Ainsi, la cimenterie de Saida peut être parmi les entreprises nationales exportatrices du clinker vu ses propriétés répondant aux normes en vigueur et ainsi être le cœur battant de la Wilaya de Saida.

R

Eférénces
Bibliographiques

- [1] PROVIS, John L. Innovation in Cements—Can We Meet Future Construction Needs Sustainably In: *CIGOS 2021, Emerging Technologies and Applications for Green Infrastructure*. Springer, Singapore, 2022. p. 29-36.
- [2] CHARRON, C. *L'industrie du ciment ; Données générales*. Ecole thématique « matériaux cimentaires », 21 au 24 septembre 2008, Holcim, P.17-69.
- [3] VAN OSS, H. G. : Cement, dans : *Minerals Yearbook (various years)*, édité par : USGS, United States Geological Survey, disponible sur : <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/cement/index.html> (dernier accès : 14 Juin 2022), 1994–2019.
- [4] KENNETH C. Curry : Cement, dans : *Cement Data Sheet – Mineral Commodity Summaries 2020*, édité par USGS, United States Geological Survey, disponible sur : <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020-cement.pdf>, (dernier accès: 14 Juin 2022), Janvier 2022.
- [5] Ashley K. Hatfield U.S. Cement Data Sheet – Mineral Commodity Summaries 2020, édité par USGS, United States Geological Survey, disponible sur: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021-cement.pdf>, (dernier accès : 14 Juin 2022), Janvier 2021.
- [6] ASHLEY K. Hatfield U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, U.S. Mineral Commodity Summaries 2022 - Cement, édité par USGS, United States Geological Survey, disponible sur : <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022-cement.pdf>, (dernier accès : 14 Juin 2022), Janvier 2022.
- [7] Les principaux pays producteurs de ciment dans le monde sur : www.statista.com, (dernier accès : 14 Juin 2022).
- [8] Nacima BENARAB, Ciment : Exportations de 5 millions de tonnes à fin 2021 édité par DZ entreprise disponible sur : <https://www.dzentreprise.net/ciment-exportations-2021> (dernier accès : 14 Juin 2022).
- [9] BENHAMOU, Y., AMEUR, M., MEKERTA, B., KAZI-AOUAL, F., SEMCHA, A., & SADOK, A. *Pathologie des sols dans la région de Saida*. 3e colloque international sur les sols non saturés. 2015. UNSAT Batna, Algérie.

- [10] SAIDI, Abdelmoumene, *et al. Inventaire et analyse de la phytodiversité dans les steppes à armoise blanche de la wilaya de SAIDA (Algérie occidentale)*. 2017. Thèse de doctorat. Université DjillaliLiabess Sidi Bel Abbès.
- [11] SALESES, Bernard. *Durabilité des matrices ciment Portland-laitier de haut-fourneau activées par des chlorures*. 2019. Thèse de doctorat. Université Paul Sabatier-Toulouse III.
- [12] HAMIDI, Nesrine. *L'effet combiné de la substitution partielle de ciment par un ajout et la température de cure sur les propriétés physico-mécanique du mortier*. 2018. Thèse de doctorat. Université Mohamed Boudiaf- M'sila
- [13] Norme AFNOR. (P1. 301) : la présente norme prescrit les propriétés des constituants des ciments courants et les proportions dans lesquelles ils doivent être combinées pour produit une série de types et de classes de ciment.
- [14] YAHIA, Mohamed. *Contribution à la valorisation d'un déchet de cimenterie (ciment hydraté) pour l'élaboration d'un nouveau ciment*. 2016. Thèse de doctorat. Université Mohamed Boudiaf- M'sila.
- [15] TAYLOR, H.F.W. *Cement Chemistry*. 1990. Academic Press, London, p.475.
- [16] GOVIN, Alexandre. *Aspects physico-chimiques de l'interaction bois-ciment. Modification de l'hydratation du ciment par le bois*. 2004. Thèse de doctorat. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne.
- [17] GINEYS, Nathalie. *Influence de la teneur en éléments métalliques sur les propriétés techniques et environnementales du ciment portland*. 2011. Thèse de doctorat. Lille 1.
- [18] T MNIF, A YAHYA, Cours Intensif., « Les injection de coulis de ciment : Méthodes de contrôle en laboratoire et en chantier ». 1994. Université de Sherbrooke.
- [19] BELMOKHTAR N., ZERAIG A. *Effet du mode d'introduction de la nano-silice sur les propriétés rhéologique et physicomécaniques des pâtes cimentaires et mortiers de ciment*. 2017. Mémoire de Master. Université M'Hamed Bougera de Boumerdes.
- [20] MABROUK, A., *Valorisation des sous produits locaux dans l'industrie du ciment Portland*. 2015. Mémoire de master en conception et calcul des structures, université de Biskra.

- [21] GOTO, S., TSUNETANI, M., YANAGIDA, H., *et al.* Diffusion of chloride ion in hardened cement paste. *YogyoKyokaishi*, 1979, vol. 87, no 3, p. 126-133.
- [22] MEKTI, Z., BOUNOUALA, M., CHETTIBI, M., *et al.* Industrial application of blast furnace slag as a substitute for sand at the cement plant of Hadjar-Soud (Algeria). *Scientific Bulletin of National Mining University*, 2018, no 1.
- [23] Documentation de la cimenterie de Hamma Bouziane, SCHB, Constantine. Algérie «le ciment portland».
- [24] BOURISSAI, Monsef. *Comportement thermo-chimio-hydro-mécanique d'un ciment pétrolier au très jeune âge en conditions de prise HP/HT : approche expérimentale et analyse par changement d'échelle*. 2010. Thèse de doctorat. Paris Est.
- [25] BARON, Jacques. *Le béton hydraulique-connaissance et pratique - 4eme partie : déformations et ruptures du béton durci ; chapitre 20 : la fatigue du béton hydraulique*. 1982.
- [26] DAHMOUN I., BELMOKHTAR L. *Valorisation du matériau cimentaire avec ajout de CVM et de résine absorbante*. 2016. Mémoire de master en génie des procédés organique et macromoléculaire. Université de Boumerdes.
- [27] MEHTA, P. K. *Studies on blended Portland cements containing Santorin earth*. *Cement and Concrete Research*, 1981, vol. 11, no 4, p. 507-518.
- [28] SHI, Caijunet DAY, Robert L. *Pozzolanic reaction in the presence of chemical activators: Part II—Reaction products and mechanism*. *Cement and Concrete Research*, 2000, vol. 30, no 4, p. 607-613.
- [29] MAILVAGANAM, Noel P., RIXOM, M. R., MANSON, Daniel P. *Et al. Chemical admixtures for concrete*. CrcPress, 1999.
- [30] GARCIA-BOIVIN, Sandra. *Retrait au jeune âge du béton : Développement d'une méthode expérimentale et contribution à l'analyse physique du retrait endogène*. 1999. Thèse de doctorat de l'école nationale des ponts et chaussées
- [31] POKKULURI, Kiran S. *Effect of admixtures, chlorides and moisture on dielectric properties of Portland cement concrete in the low microwave frequency range*. 1998. Thèse de doctorat. Virginia Tech.

- [32] Le Site, Institutionnel Du LERM. La lettre d'information du Lerm. Spéciale eau, épisode. mars, 2014, vol. 2014.
- [33] GUILLON, Emmanuel. *Durabilité des matériaux cimentaires : modélisation de l'influence des équilibres physico-chimiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques résiduelles*. 2004. Thèse de doctorat. École normale supérieure de Cachan-ENS Cachan.
- [34] BOUGLADA, Mohammed Salah. *Caractérisation physico-chimique et microstructurale des ajouts minéraux*. 2019. Thèse de doctorat. Université de Batna 2.
- [35] BEGARIN, Farid. *Etude de paramètres endogènes et exogènes au ciment Portland ordinaire influençant l'hydratation de sa phase principale : le silicate tricalcique*. 2012. Thèse de doctorat. Université de Bourgogne.
- [36] BRUNAUER, Stephen et GREENBERG, S. A. *The Hydration of tricalcium silicate and B-dicalcium silicate at room temperature*. Portland Cement Association, Research and Development Laboratories, 1960.
- [37] YANKWA, Djobo et NOEL, Jean. *Effets de l'incorporation d'adjuvants minéraux sur les propriétés de ciments géopolymères à base de scories volcaniques*. 2013. Thèse de doctorat. Université de Yaoundé 1.
- [38] BOUGLADA, Mohamed Salah. *Effet de l'activation du ciment avec ajout minéral par la chaux fine sur le comportement mécanique du mortier*. 2008. Thèse de magister. Université de M'Sila-Mohamed Boudiaf.
- [39] DAY, Robert L. et SHI, Caijun. *Influence of the fineness of pozzolan on the strength of lime natural-pozzolan cement pastes*. *Cement and Concrete Research*, 1994, vol. 24, no 8, p. 1485-1491.
- [40] R.SERSALE. *Structure et caractérisation des pouzzolanes et des cendres volantes*. pouzzolane artificiel, Sous thème IV-1.7ème Congrès International de la chimie des ciments. 1980, Vol I. Paris.
- [41] HEWLETT, Peter et LISKA, Martin (ed.). *Lea's chemistry of cement and concrete*. Butterworth-Heinemann, 2019.

- [42] HAMAMI, Ameer El Amine. *Vers une prédiction de la perméabilité au gaz à partir de la composition des matériaux cimentaires*. 2009. Thèse de doctorat. Université de la Rochelle.
- [43] Xu H. and van Deventer J.S.J. Geopolymerisation of Multiple Minerals. *Minerals Engineering* 15 (2002) 1131-1139.
- [44] TCHAKOUTÉ KOUAMO, Hervé. *Elaboration et caractérisation de ciments géopolymères à base de scories volcaniques*. 2013. Thèse de doctorat. Université de Yaoundé I.
- [45] BELHOCINEA., NAGOUDI N. *Etude expérimentale d'un mortier avec ajouts minéraux*. 2014. Mémoire de Master en Génie Civil. Université KasdiMerbah -Ouargla.
- [46] KERBOUCHE, A., MOULI, M., LAOUFI, L., *et al.* Influence des ajouts minéraux sur les résistances mécaniques des mortiers. In: *SBEIDCO-1st International Conference on sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries*. 2009. p. 438.
- [47] ZEROUB, Hamid. *Valorisation du verre dans l'élaboration de béton durable (Approche expérimentale)*. 2012. Mémoire de magister. Université de Boumerdès- M'hamedBougara.
- [48] CHANVILLARD, Gilles. Le matériau béton : connaissances générales. *Les cours de l'ENTPE*, 1999.
- [49] KARA-ALI, Ramdane. *Influence des additions minérales sur le besoin en eau et les résistances mécaniques des mélanges cimentaires*. 2002. Thèse de doctorat. Cergy-Pontoise.
- [50] RAFI, Mohammad. *Effet de l'incorporation des déchets de marbre des sites miniers sur les caractéristiques physiques, mécaniques et de durabilité du béton à base de ciment local GHORI*. 2022. Thèse de doctorat. CY Cergy Paris Université.
- [51] TOKYAY, Mustafa. *Cement and concretemineral admixtures*. CRC Press, 2016.
- [52] DEJOU, J. Les céramiques. Support de cours. *Sociétés francophone des biomatériaux dentaires*, 2010.
- [53] KENFAUI, Driss. *Étude des propriétés mécaniques et thermoélectriques des matériaux $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$ texturés pour la conversion d'énergie*. 2010. Thèse de doctorat. Université de Caen.
- [54] SLACK, Glen A. The thermal conductivity of non-metallic crystals. *Solid state physics*, 1979, vol. 34, p. 1-71.

- [55] HAUSSONNE, Jean-Marie. *Céramiques et verres : principes et techniques d'élaboration*. PPUR presses polytechniques, 2005.
- [56] DAO, PhucLam. *Valorisation des laitiers LWS dans les mélanges granulaires*. 2010. Thèse de doctorat. Université Henri Poincaré-Nancy 1.
- [57] Júlia SOLLERO DE PAULA. *Recyclage des déchets du chantier*. 2014. Séminaire de recherche de master à l'école normale supérieure d'architecture, Paris-Malaquais.
- [58] FAESSLER, Jérôme. Biogaz et Energie : enjeux globaux et réalités locales. In : *Cycle de formation Energie-Environnement 2012-2013*. 2013. p. 40.
- [59] AWOYERA, Paul O., NDAMBUKI, Julius M., AKINMUSURU, Joseph O., *et al*. Characterization of ceramic waste aggregate concrete. *HBRC journal*, 2018, vol. 14, no 3, p. 282-287.
- [60] CH, Hemanth Kumar, ANANDA RAMAKRISHNA, K., SATEESH BABU, K., *et al*. Effect of waste ceramic tiles in partial replacement of coarse and fine aggregate of concrete. *International Advanced Research Journal of Science, Engineering and Technology*, 2015, vol. 2, no 6, p. 13-16.
- [61] MARWEIN, Batriiti Monhun R., SNEHA, M., et BHARATHIDASAN, I. A review paper on utilisation of ceramic waste in concrete. *Int. J. Sci. Eng. Res. (IJSER)*, 2016, vol. 7, no 4, p. 247-250.
- [62] PACHECO-TORGAL, Fernando et JALALI, Said. RETRACTED ARTICLE: Compressive strength and durability properties of ceramic wastes based concrete. *Materials and structures*, 2011, vol. 44, no 1, p. 155-167.
- [63] **NA 5044V 2005** : Institut algérien de normalisation, CTN47 Liants-Bétons *Liants hydrauliques - Méthode pratique instrumentale d'analyse des ciments par spectrométrie de fluorescence des rayons X* adopté le 22/03/2004 équivalent à la norme Afnor P 15-467: 1985, catalogue des normes algériennes 2014.
- [64] **NA 5042 2007** : Institut algérien de normalisation, CTN47 Liants-Bétons *Liants hydrauliques - Méthodes d'essais des ciments – Analyse chimique des ciments*. adopté le 13/11/2007 équivalent à la norme EN 196-2 :2005, catalogue des normes algériennes 2014.

- [65] **NA 231 2006** : Institut algérien de normalisation, CTN47 Liants-Bétons *Liants hydrauliques - Méthodes d'essais des ciments – Détermination de la finesse*. Adopté le 13/11/2007 équivalent aux normes EN 196-6 : 1989 P 15-476, catalogue des normes algériennes 2014.
- [66] **NA 230 2010** : Institut algérien de normalisation, CTN47 Liants-Bétons *Ciments - Détermination du temps de prise et de la stabilité*. Révisé année 2010 équivalent aux normes EN 196-3 :1995 P 15-473, catalogue des normes algériennes 2014.
- [67] MAZA M. Fascicule de travaux pratiques matériaux de constructions. Département de Génie Civil. Université Med Boudiaf M'Sila. Année universitaire 2016-2017
- [68]**NA 234 2007** : Institut algérien de normalisation, CTN47 Liants-Bétons *Ciments - Méthodes d'essais des ciments - Détermination des résistances mécaniques*, adopté le 12/06/2007 équivalent à la norme EN 196-1 : 2005, catalogue des normes algériennes 2014.
- [69]**NA 5209 1992** : Institut algérien de normalisation, CTN39 Construction – Bâtiment - *Sols – Reconnaissance et essais – Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux – Méthode par étuvage*, adopté le 30/11/1992 équivalent à la norme NF P 94-050:1991, catalogue des normes algériennes 2014.
- [70]**NF P18-560** AFNOR, French Standardization Association, *Aggregates, particle size analysis by sieving*, Paris, France, 1990.
- [71]**NF 18-598** AFNOR, French Standardization Association *Mesure de l'Equivalent de sable, La nature du sable*, Paris, France, 1991.
- [72] **NF EN 1097-3/1998**. Tests des propriétés physiques et mécaniques des agrégats. Partie 3 : Détermination de la masse volumique apparente.
- [73] **NA 255 2006** : Institut algérien de normalisation, CTN37 Liants-Bétons-*Granulats Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats – Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau*. adopté le 26/11/2005équivalent aux normes EN 1097-6 :2001 P 18-650-6, catalogue des normes algériennes 2014.
- [74] **NF EN 1097-6** : Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats – Partie 6 : Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau

- [75] **NF EN 933-9** : Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats et physiques des granulats – Partie 9 : qualification des fines-essai au bleu de méthylène
- [76] GHOMARI, F. Cours Science des matériaux de construction, Faculté des Sciences département génie civil. 2006 Université Aboubaker Belkaid,
- [77] Norme ENV 197-1. Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants
- [78] M. MEROUANE Abdellah. *Synthèse et caractérisation d'un ciment belitique riche en α -C₂S et de haute réactivité hydraulique*, mémoire de Magister en Physicochimie des Matériaux Minéraux. 2009 Université Mohamed Boudiaf Oran
- [79] GHOMRANI Khalida, BENTOUHAMI Fatima. *Etude de la durabilité d'un ciment avec ajout*. Mémoire de Master en Génie civil option matériaux, Université Mohamed El Bachir Elibrahimi – Bordj Bou Arreridj 2016
- [80] DJERMANE Abdellah, DJEFFAL Kamal. *Influence du refus et de l'ajout sur la résistance mécanique à jeune âge et à long terme du ciment : cas du CEMII/A-L- 42.5N*. Mémoire de Master en chimie des matériaux, 2021 Université Larbi BenMhidi Oum ElBouaghi.
- [81] BOUBEKEUR, Toufik, BOULEKBACHE, Bensaid, SALHI, Mohamed, *et al.* Beneficial Effect of Incorporation of Slag on the Hydration Heat, Mechanical Properties and Durability of Cement Containing Limestone Powder. In: *MATEC Web of Conferences*. EDP Sciences, 2020. p. 01047.
- [82] DINE, HadjDjelloul Nasser. L'effet de la teneur en carbonate de magnésium sur la fabrication de Clinker. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research* Volume 8 Issue 8. 2021.
- [83] **NF EN 933-9** : Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats et physiques des granulats – Partie 9 : qualification des fines-essai au bleu de méthylène
- [84] LI, Xuerun, XU, Wenlong, WANG, Shaopeng, *et al.* Effect of SO₃ and MgO on Portland cement clinker: Formation of clinker phases and alite polymorphism. *Construction and Building Materials*, 2014, vol. 58, p. 182-192.
- [85] HORKOSS, Sayed, LTEIF, Roger, et RIZK, Toufic. Calculation of the C 3 A percentage in high sulfur clinker. *International journal of analytical chemistry*, 2010, vol. 2010.

- [86] LIN, Kae-Long et LIN, Chung-Yi. Hydration characteristics of waste sludge ash utilized as raw cement material. *Cement and Concrete Research*, 2005, vol. 35, no 10, p. 1999-2007.
- [87] SORRENTINO, François. Chemistry and engineering of the production process: State of the art. *Cement and Concrete Research*, 2011, vol. 41, no 7, p. 616-623.
- [88]. OUDJIT, M., OUELD, A. M., BELLAL, A., et al. Comportement Rhéologique Et Mécanique Des Mortiers à Base d'Ajouts Cimentaires. *8ème séminaire technique de Lafarge, Mercure, Alger*, 2011, vol. 3, p. 153-162.
- [89].SAHI, Amal. *Validation expérimentale d'un modèle de sélection optimale des liants dans la fabrication des remblais miniers cimentés*. Mémoire de maitrise Es sciences appliquées, Ecole Polytechnique. Montreal (Canada), 2016.
- [90] BELEM, T., PEYRONNARD, O., et BENZAAZOUA, M. A model of formulation of blended binders for use in cemented mine backfills. In: *Mine Waste 2010: Proceedings of the First International Seminar on the Reduction of Risk in the Management of Tailings and Mine Waste*. Australian Centre for Geomechanics, 2010. p. 433-447.
- [91] BOUNEMEUR, Nadira, BENZAID, Riad, et ATOUB, Souad. Geological, Hydrological and Geotechnical Impact for the Landslides Susceptibility in Mila Basin (Northeast Algeria). In: *Conference of the Arabian Journal of Geosciences*. Springer, Cham, 2019. p. 11-15.
- [92].KROUR, Hichem. *Recyclage du ciment dans le ciment : incorporation des déchets de construction et de démolition dans le cru cimentier*. 2021. Thèse de doctorat. Université de Lorraine.
- [93].FROHARD, Fabien. *Durabilité des éco-bétons : impact d'additions cimentaires alternatives sur la corrosion des armatures dans les bétons armés*. 2014. Thèse de doctorat. Paris Est.
- [94].MOHAMMED, Silineet SAFIULLAH, Omary. Optimization of the SO₃ content of an Algerian Portland cement: Study on the effect of various amounts of gypsum on cement properties. *Construction and Building Materials*, 2018, vol. 164, p. 362-370.
- [95].LAAKRI, Meriem. *Influence des ajouts locaux sur les propriétés physico-chimique et mécanique de la pâte cimentaire*. 2020. Thèse de doctorat. Université Houari Boumediene.
- [96].BELARIBI, Omar. *Durabilité des bétons autoplaçants à base de vase et de pouzzolane*. 2015. Thèse de doctorat en cotutelle. Université Cergy-Pontoise. France et Université Ben Bédis Mostaganem.

- [97]. FROHARD, Fabien, CHAUSSADENT, Thierry, DIVET, Loïc, *et al.* Propriétés des bétons incorporant des additions cimentaires alternatives : Durabilité vis-à-vis du risque de corrosion. In : *Journées Techniques Ouvrages d'Art 2014*. 2014. p. 17p.
- [98]. PACHECO-TORGAL, Fernando et JALALI, Said. Retracted article: Compressive strength and durability properties of ceramic wastes based concrete. *Materials and structures*, 2011, vol. 44, no 1, p. 155-167.
- [99] NACERI, A. et MESSAOUDENE, I. Effet de l'activation mécanique du laitier de haut fourneau sur le comportement mécanique du mortier. *Lebanese Science Journal*, 2006, vol. 7, no 2, p. 85-96.
- [100] DEBOUCHA, W., BELAGRAA, L., BOUZID, A., *et al.* L'effet des fillers de calcaire sur les propriétés physico-chimiques du mortier à base de CRS. In : *Colloque International Francophone NoMaD*. 2012. p. 298-306.
- [101]. BONAVENTTI, V., DONZA, H., MENENDEZ, G., *et al.* Limestone filler cement in low w/c concrete: A rational use of energy. *Cement and Concrete Research*, 2003, vol. 33, no 6, p. 865-871.
- [102]. THONGSANITGARN, Pailyn, WONGKEO, Watcharapong, SINTHUPINYO, Sakprayut, *et al.* Effect of limestone powders on compressive strength and setting time of Portland-limestone cement pastes. In : *Advanced materials research*. Trans Tech Publications Ltd, 2012. p. 322-326.
- [103]. OEY, Tandré, KUMAR, Aditya, BULLARD, Jeffrey W., *et al.* The filler effect: the influence of filler content and surface area on cementitious reaction rates. *Journal of the American Ceramic Society*, 2013, vol. 96, no 6, p. 1978-1990.
- [104]. SATO, Taijiro et DIALLO, Fatoumata. Seeding effect of nano-CaCO₃ on the hydration of tricalcium silicate. *Transportation Research Record*, 2010, vol. 2141, no 1, p. 61-67.
- [105] SENHADJI, Y., ESCADEILLAS, Gilles, MOULI, M., *et al.* Influence of natural pozzolan, silica fume and limestone fine on strength, acid resistance and microstructure of mortar. *Powder technology*, 2014, vol. 254, p. 314-323.
- [106] KHAN, Hammad A., CASTEL, Arnaud, KHAN, Mohammad SH, *et al.* Durability of calcium aluminate and sulphate resistant Portland cement based mortars in aggressive sewer environment and sulphuric acid. *Cement and Concrete Research*, 2019, vol. 124, p. 105852.

- [107] Zhang, G., Wu, C., Hou, D., Yang, J., Sun, D., & Zhang, X. (2021). Effect of environmental pH values on phase composition and microstructure of Portland cement paste under sulfate attack. *Composites Part B: Engineering*, 216, 108862.
- [108] SAKIR, Shamir, RAMAN, Sudharshan N., SAFIUDDIN, Md, *et al.* Utilization of by-products and wastes as supplementary cementitious materials in structural mortar for sustainable construction. *Sustainability*, 2020, vol. 12, no 9, p. 3888.
- [109] KAMALI, Siham, MORANVILLE, Micheline, et LECLERCQ, Stéphanie. Material and environmental parameter effects on the leaching of cement pastes: experiments and modelling. *Cement and concrete research*, 2008, vol. 38, no 4, p. 575-585.
- [110] KALLEL, Taheni, KALLEL, Abderrazek, et SAMET, Basma. Durability of mortars made with sand washing waste. *Construction and Building Materials*, 2016, vol. 122, p. 728-735.
- [111].BINICI, Hanifi. Effect of crushed ceramic and basaltic pumice as fine aggregates on concrete mortars properties. *Construction and building materials*, 2007, vol. 21, no 6, p. 1191-1197.

Annexe

CLASSIFICATION DES CEMENTS [NE 197-1 2001]

Désignations	Types de ciments	Teneur en clinker	Teneur en % de l'un des constituants suivants: laitier, pouzzolanes, cendres, calcaires, schistes, fumées de silice	Teneur en constituants secondaires
CPA-CEM I	Ciment Portland	95 à 100%		0 à 5%
CPJ-CEM II/A	Ciment Portland composé	80 à 94%	de 6 à 20 % de l'un quelconque des constituants, sauf dans les cas où le constituant est des fumées de silice auquel cas la proportion est limitée à 10 % (*).	0 à 5%
CPJ-CEM II/B		65 à 79%	de 21 à 35 % avec les mêmes restrictions que ci-dessus (*)	0 à 5%
CEM III/A	Ciment de haut-fourneau	35 à 64%	36 à 65 % de laitier de haut-fourneau.	0 à 5%
CEM III/B		20 à 34%	66 à 80 % de laitier de haut-fourneau	0 à 5%
CEM III/C		5 à 19%	81 à 95 % de laitier de haut-fourneau	0 à 5%
CEM IV A	Ciment pouzzolanique	65-89	11 à 35% de l'un quelconque des constituants	0-5

CEM IV B	Ciment pouzzolanique	45-64%	36-55% de l'un quelconque des constituant	0-5
CEM V A	Ciment composé	40-64%	18 à 30% de laitier de haut-fourneau et 16 à 30% de pouzzolane naturelle ou naturelle calcinée, cendre volante siliceuses.	0-5
CEM V B		20-38	31 à 50% laitier de haut-fourneau et même pourcentage de pouzzolane naturelle ou naturelle calcinée, cendre volante siliceuses.	0-5

(*) Le pourcentage de fillers est limité à 5%.