

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE BLIDA 1

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE DES PROCEDES

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU

DIPLOME DE MASTER

SPECIALITE : GENIE DES PROCEDES DES MATERIAUX

Sous le thème

**INFLUENCE DE (LA POUZZOLANE ET DU CALCAIRE) SUR LES
PROPRIETES PHYSICO-MECANQUES DUCIMENT PORTLAND
COMPOSE**

Encadré par :

Mr BOURAS Omar

Présenté par :

Mr.MEKKI Anes Yasser

Mr.BAKIR Mohamed Islam

Année Universitaire 2023/2024

Remerciements

Tout d'abord, nous sommes reconnaissants envers ALLAH« Le Tout-Puissant » pour nous avoir accordé le courage, la santé et la volonté nécessaires pour mener à bien ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer notre gratitude envers notre promoteur, Pr. Omar BOURAS, pour son encadrement exceptionnel, sa patience, ses conseils et orientations précieux, sa rigueur et sa disponibilité tout au long de la préparation de ce mémoire.

Nous n'oublions de remercier aussi toute l'équipe du département de contrôle qualité et la responsable de laboratoire de génie des matériaux et à leur tête Mme. Lamia.

Nombreuses sont les personnes qui nous ont apportés leurs aides et leurs soutiens notamment nos camarades, sans mentionner leurs noms, qui nous ont beaucoup aidé. Nous tenons à les présenter nos remerciements les plus sincères.

Enfin, nous dédions ce modeste travail à nos parents qui nous ont élevé, instruit et surtout pour leurs sacrifices. Les mots s'épuisent sans doute, mais vous comprendrez que tout un univers de paroles ne pourrait suffire pour vous dire **MERCI**, et à tous ceux et celles qui ont contribué de près ou de loin à nos réussites.

TABLE DES MATIERES

I. CHAPITRE I	3
GENERALITES SUR LA PRODUCTION DE CIMENT	3
I.1 HISTORIQUE	3
I.2 CIMENT.....	4
I.3 CONSTITUANTS DES CEMENTS.....	4
I.4 ETAPES DE FABRICATION DU CIMENT	5
I.4.1 EXTRACTION ET LA PREPARATION DES MATIERES PREMIERES.....	5
I.4.2 SECHAGE ET BROYAGE.....	6
I.4.3 CUISSON DU MELANGE DU CLINKER. [13].....	6
I.4.4 CLINKERISATION	8
I.4.5 BROYAGE DU CLINKER	8
I.4.6 PRODUIT FINAL (CIMENT)	8
II. CHAPITRE II	9
AJOUTS CIMENTAIRES	9
II.1 AJOUTS CIMENTAIRES.....	9
II.2 DEFINITION	9
II.3 CLASSIFICATION.....	9
II.3.1 AJOUTS MINERAUX ACTIFS	9
II.4 PROPRIETES ET CARACTERISTIQUES [23]	12
II.4.1 PROPRIETES HYDRAULIQUES	12
II.4.2 PROPRIETES PHYSIQUES DE REMPLISSAGE	13
II.5 UTILISATION DES AJOUTS EN ALGERIE	13
II.6 AVANTAGES DE L'UTILISATION DES AJOUTS MINERAUX [21].....	14
II.6.1 BENEFICES FONCTIONNELS	14
II.6.2 BENEFICES ECONOMIQUES.....	14

II.6.3	BENEFICES ECOLOGIQUES ET ENVIRONNEMENTAUX.....	14
II.7	HYDRATATION DU CIMENT	14
II.7.1	REACTIONS D'HYDRATATION	14
II.7.2	HYDRATATION ET REACTION POUZZOLANIQUES	17
III.	CHAPITRE III.....	19
	MATERIEL ET METHODOLOGIE EXPERIMENTALE	19
III.1	INTRODUCTION.....	19
III.2	CONTROLE DE QUALITE	19
III.3	ANALYSES CHIMIQUES	19
III.3.1	MATERIEL ET PRODUITS UTILISES.....	19
III.3.2	DETERMINATION DE LA CHAUX LIBRE PAR UNE ACIDIMETRIE.....	20
III.3.3	DETERMINATION DU SO ₃	21
III.3.4	DETERMINATION DE LA PERTE AU FEU PAF.....	21
	EXPRESSION DES RESULTATS :.....	21
III.4	ANALYSES PHYSICOMECANIQUES	22
III.4.1	MATERIEL ET PRODUITS UTILISES.....	22
III.4.2	MESURE DES REFUS PAR TAMISAGE ALPINE.....	22
III.4.3	ESSAI PAR COMPRESSION	23
IV.	CHAPITRE IV	27
	RESULTATS ET DISCUSSION.....	27
IV.1	SYNTHESE DU CIMENT	27
IV.2	ANALYSE CHIMIQUE DES MATIERES PREMIERES.....	27
IV.3	PREPARATION DES CONSTITUANTS DU CIMENT	29

IV.3.1 SECHAGE.....	29
IV.3.2 CONCASSAGE.....	29
IV.3.3 BROYAGE.....	29
IV.3.4 TAMISAGE.....	30
IV.4 PREPARATION DU CIMENT	30
IV.5 RESULTATS D'ANALYSE CHIMIQUE.....	31
IV.5.1 PERTE AU FEU	31
IV.5.2 CHAUX LIBRE.....	31
IV.5.3 DETERMINATION DU SO ₃	32
IV.6 RESULTATS DES ANALYSES PHYSIQUES.....	33
IV.6.1 REFUS PAR TAMISAGE ALPINE.....	33
IV.6.2 ESSAI PAR COMPRESSION	33
IV.7 PREPARATION DU DEUXIEME CIMENT	35
IV.8 COMPARAISON DES RESULTATS DES ANALYSES CHIMIQUES	35
IV.8.1 PERTE AU FEU	35
IV.8.2 CHAUX LIBRE.....	36
IV.8.3 DETERMINATION DU SO ₃	37
IV.9 COMPARAISON DES RESULTATS D'ANALYSES PHYSIQUES	37
IV.9.1 Essai par compression	47
IV.10 Conclusion générale.....	37

Liste des Figures

Figure I-1. Photographies montrant les carrières d'extraction du calcaire et de l'argile	5
Figure I-2. Photographies montrant (a) : Atelier de concassage du calcaire ; (b) : Broyeur de la matière première.....	6
Figure I-3. Photographie montrant la zone de cuisson	8
Figure II-1. Schéma montrant la couche protectrice d'ettringite [22].....	15
Figure II-2. Schéma montrant l'hydratation du clinker de ciment Portland [18]	18
Figure II-3. Schéma montrant l'hydratation du ciment à la pouzzolane	18
Figure IV-1. Resultat de la PAF dans les deux cas	36
Figure IV-2. Pourcentage de la CaO libre dans les deux cas	36
Figure IV-3. Pourcentage de SO3 dans les deux Cas	37
Figure IV-4. Résultat d'essai par compression de 1er cas	Error! Bookmark not defined.
Figure IV-5. Résultat d'essai par compression de 2eme cas.....	38

Liste des Tableaux

Tableau II-1. Utilisation des ajouts dans les cimenteries algériennes [21].....	13
Tableau II-2. Composition minéralogique du ciment [18]	17
Tableau III-1. Matériel et produit utilisé dans les analyses chimiques.....	20
Tableau IV-1. Composition minéralogique du calcaire	27
Tableau IV-2. Composition minéralogique de clinker.....	29
Tableau IV-3. Composition minéralogique de pouzzolane	28
Tableau IV-4. Composition minéralogique gypse	28
Tableau IV-5. Différents ciments préparés	30
Tableau IV-6. Résultats de PAF pour chaque mélange.....	31
Tableau IV-7. Résultat de la Chaux libre	32
Tableau IV-8. Résultats des pourcentages de SO ₃	32
Tableau IV-9. Pourcentages de refus en fonction des mélanges.	33
Tableau IV-10. Résistance de compression des mélanges préparés	34
Tableau IV-11. Différents ciments préparés (2eme cas).....	35

LISTE DES ABREVIATIONS ET SYMBOLES

S.C.M.I	La Société des Ciments de la Mitidja Industriel
GICA	Groupe industriel des ciments Algérie
CAO	La chaux libre
C2S	Silicate bi-calcique ou (bélite), sa formule chimique est $2\text{CaO}, \text{SiO}_2$.
C3S	Silicate tricalcique dénommé (alite), sa formule chimique est $3\text{CaO}, \text{SiO}_2$.
C3A	Aluminates tricalciques ou (célite), sa formule chimique est $3\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3$.
C4AF	Ferro-aluminates tétra-calcique, de formule chimique $4\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3$.
PAF	La perte au feu

ملخص

يعد استعمال المضافات مثل البوزلان في صناعة الاسمنت من خلال التعويض الجزئي للكلينكر تقنية قليلة الاستعمال في هذا المجال. وعليه كان من المناسب العمل على معرفة تأثير هذه الاضافات على الخصائص الفيزيائية, الكيميائية وحتى الميكانيكية.

النتائج المتحصل عليها خلال العمل التجريبي المنجز تؤكد بما لا يدع مجالاً للشك الدور الفعال لهذه الإضافات ومساهمتها الفعالة في تحسين هذه الخصائص. حيث تم اعتماد برتوكول تجريبي يركز على استعمال نسب متغيرة من إضافات البوزولان والكلكير في كل مرة بينما يستعمل الكلينكر والجبس بنسب ثابتة.

استعمال أنواع من الاسمنت بهذه الخصائص يساهم في تحسين الخصائص المذكورة سابقا , اضافة إلى المساهمة في التقليل من كمية الطاقة المستعملة في إنتاج الاسمنت.

ABSTRACT

The incorporation of additions such as pozzolan and limestone as a partial replacement for cement is a little-known practice in the construction sector. It was therefore essential to study and evaluate the impact of these additions on the physico-mechanical properties of cement and the durability of mortars and concretes.

The experimental phase consists of working on mixtures to which we change each time the percentages of additions with fixed values for clinkaire and gypsum.

The use of this type of cement makes it possible not only to obtain sustainable structures, but also to achieve energy savings when producing cement.

RESUME

L'incorporation d'ajouts telle que la pouzzolane et le calcaire en remplacement partiel du ciment est une pratique peu connue dans le secteur de la construction. C'est pourquoi il était primordial d'étudier et d'évaluer l'impact de ces ajouts sur les propriétés physico-mécaniques du ciment ainsi que la durabilité des mortiers et des bétons.

Le protocole expérimental consiste à travailler sur des mélanges auquel nous changeons chaque fois les pourcentages des ajouts avec des valeurs fixes pour le clinkaire et le gypse.

L'utilisation de ce type de ciment permet non seulement d'obtenir des ouvrages durables, mais également de réaliser des économies d'énergie lors de la production du ciment.

Mots clés : Calcaire, Pouzzolane, Ciment, Mortier, Durabilité, Résistance

Introduction générale

Le ciment est l'un des matériaux de construction les plus utilisés dans le monde puisque chaque année l'industrie du ciment produit environ plus 1,6 milliard tonnes de ciment Portland. Plus de 5 à 8% des émissions mondiales de (CO₂) sont induite de cette production.

Les ciments Portlands exigent pour leurs fabrications la consommation considérables d'énergie surtout pour l'élaboration de clinker. Dans cette partie la clinkérisation est la plus importante du procédé de fabrication du ciment pour ce qui concerne la consommation d'énergie et les rejets dans l'atmosphère du fait de la nécessité d'atteindre une température d'environ 1500 °C.[12]

L'utilisation des additions minérales comme le Calcaire et la Pouzzolanes naturelles en tant que substitution du ciment présentent une façon efficace pour l'industrie du ciment de diminuer ses émissions de CO₂.

Cette étude expérimentale consiste à préparer un ciment avec addition minérale naturelle en remplaçant un certain pourcentage de Clinker par l'ajout pouzzolane et le Calcaire substitué à divers pourcentages.

Dans cette étude, nous nous sommes proposés de varier le pourcentage de l'ajout Pouzzolane et Calcaire dans le ciment par la méthode de substitution (remplacement partiel du clinker par la Pouzzolane et le Calcaire).

Ce travail a pour objectif d'évaluer les propriétés physiques, chimiques et mécaniques du ciment tout en prenant en compte les deux volets économique et écologique.

- Le premier chapitre est une introduction au ciment, où on a exposé les différents types de ciment existant, leurs fabrications, leurs composantes, et bien d'autres propriétés.
- Le deuxième chapitre est la généralité et différents types des ajouts minéraux et hydratations du ciment.

- Le troisième chapitre étudie dans cette partie la caractérisation des matériaux utilisés et les méthodes d'essais réalisés sur les mortiers, et l'analyse des résultats.

I. Chapitre I

Généralités sur la production de ciment

I.1 Historique

Les Romains et les Grecs étaient déjà capables de produire du liant hydraulique il y a plus de 2000 ans en faisant réagir de la "chaux éteinte" Ca(OH)_2 et des cendres volcaniques, en particulier celle de la région de Pouzzoles, qui étaient riches en silice. Les caractéristiques de ce matériau sont associées à une technologie très avancée, ce qui semble jouer un rôle essentiel dans l'évolution de l'empire romain.

La construction de structures monumentales, inhabituelles pour cette époque de l'histoire, et d'une durabilité exceptionnelle ont été facilitées grâce à elle : le Panthéon avec sa coupole de 44 mètres de diamètre, le Colisée à Rome et le pont du Gard sont des monuments datant de plus de 1800 ans [1,3].

La fabrication et l'utilisation de ce matériau ont ensuite été oubliées à la chute de l'empire, avec le retour de la maçonnerie en pierre. En 1756, Smeaton retrouve les caractéristiques hydrauliques du mélange de calcaire et d'argile.

En 1817, Vicat, un ingénieur français, fournit les proportions de calcaire et de silice pour former le mélange qui, après cuisson, deviendra un véritable liant hydraulique [4].

C'est seulement en 1845 que l'Anglais Johnson indique de façon précise les règles de fabrication du ciment. La dénomination Portland, due à la similarité de couleur et de dureté avec la pierre de Portland (Sud de l'Angleterre), est à l'heure actuelle toujours employée dans l'industrie [5].

Les recherches menées depuis 1970 sur le béton, et particulièrement sur ses constituants actifs, conduisent à un nouveau bond qualitatif et quantitatif de ses propriétés. Aux Etats-Unis et au Japon, on fabrique et on met en œuvre, dans les années 1980, des bétons à hautes performances dont la résistance à la compression atteint 100 MPa, et même 140 MPa dans un immeuble à Seattle aux Etats-Unis. En laboratoire, on obtient, d'ores et déjà, des résistances supérieures à 600 MPa [6].

I.2 Ciment

Le ciment Portland est l'un des types les plus courants de ciment utilisés dans l'industrie de la construction. Il tire son nom de la ressemblance de sa couleur avec celle de la pierre de Portland, une pierre calcaire provenant de l'île de Portland en Angleterre.

Le ciment Portland est fabriqué en broyant finement du clinker, qui est produit par la cuisson à haute température d'un mélange spécifique de calcaire et d'argile.

Le clinker de ciment Portland est composé principalement de silicates de calcium, d'aluminates de calcium et de ferrites de calcium, qui réagissent avec l'eau lors de l'hydratation pour former des composés chimiques complexes. Cette réaction chimique permet au ciment Portland de durcir et de développer des propriétés essentielles telles que la résistance, l'adhérence et la durabilité.

Le ciment Portland est largement utilisé dans la fabrication de béton, de mortier et d'autres produits de construction. Il offre une grande polyvalence, ce qui lui permet de s'adapter à différentes applications, des structures résidentielles aux grands projets d'infrastructure. Le ciment Portland est disponible dans différentes classes et résistances, ce qui permet de l'adapter aux exigences spécifiques de chaque projet.

I.3 Constituants des ciments

I.4.1. Clinker

C'est un produit obtenu par cuisson jusqu'à fusion partielle (Clinkérisation) du mélange calcaire + argile, dosé et homogénéisé et comprenant principalement de la chaux (CaO) de la silice (SiO₂) et de l'alumine (Al₂O₃).

Le mélange est en général constitué à l'aide de produits naturels de carrière (calcaire, argile, marne ...). C'est le clinker qui, par broyage, en présence d'un peu de sulfate de chaux (gypse) jouant le rôle de régulateur, donne des Portland.[15]

I.4.2. Gypse

Le gypse est la matière première utilisée pour la fabrication du ciment. Cette roche minérale s'est formée il y a 40 millions d'années grâce à l'évaporation de l'eau de mer.

Le gypse est constitué en couches épaisses et se trouve aujourd'hui enterrée sous terre. Ces couches de gypse sont séparées entre elles par d'autres masses rocheuses.

L'addition de gypse au clinker a pour but de régulariser la prise du ciment, notamment de ceux qui contiennent des proportions importantes d'aluminate tricalcique.

Grâce à ce gypse, la prise du ciment, c'est-à-dire le début de son durcissement, s'effectue au plus tôt une demi-heure après le début de l'hydratation. Sans gypse, la prise serait irrégulière et pourrait intervenir trop rapidement.[16]

I.4 Etapes de fabrication du ciment

La fabrication du ciment est un procédé complexe qui exige un savoir-faire, une maîtrise des outils et des techniques de production, des contrôles rigoureux et continus de la qualité. Ce procédé comporte les étapes de fabrication suivantes :

I.4.1 Extraction et la préparation des matières premières.

Les matières premières sont extraites des parois rocheuses d'une carrière à ciel ouvert par abattage à l'explosif ou à la pelle mécanique ou encore par ripage au bulldozer. La roche est reprise par des dumpers vers un atelier de concassage.

Pour produire des ciments de qualités constantes, les matières premières doivent être très soigneusement échantillonnées, dosées et mélangées de façon à obtenir une composition parfaitement régulière dans le temps.



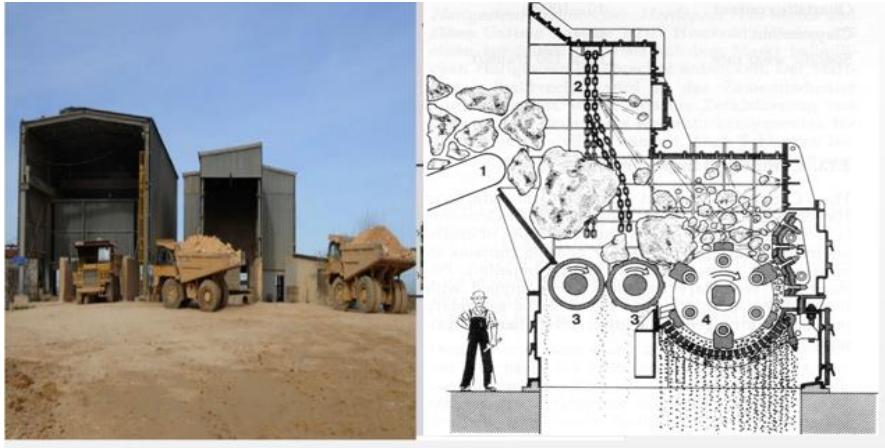
Figure 0-1. Photographies montrant les carrières d'extraction du calcaire et de l'argil

I.4.2 Séchage et Broyage

Les matières premières extraites sont préparées et transformées en une matière première homogène appelée mélange cru. Le calcaire et l'argile sont concassés, broyés et mélangés selon des proportions spécifiques pour obtenir une composition chimique précise.

(Calcaire 80%, Argile 17%, Sable 2%, Minerai de Fer 1%)

(a)



(B)



Figure 0-2. Photographies montrant (a) : Atelier de concassage du calcaire ; (b) : Broyeur de la matière première

I.4.3 Cuisson du mélange du clinker. [13]

Le processus de fabrication du clinker, principal composant du ciment Portland, comprend plusieurs étapes. Voici un résumé des principales étapes :

I.4.3.1 Préchauffeur à cyclones

Le préchauffeur à cyclones est utilisé pour le dépoussiérage des gaz et le transfert de chaleur à la poussière pendant son bref séjour dans la gaine de gaz. Les différentes étapes du processus de formation du clinker sont régies dans cette étape.

I.4.3.2 Séchage de la matière

Cette étape consiste à évaporer l'eau présente dans les matières premières, ce qui se produit lorsque la température atteint 100 °C.

I.4.3.3 Déshydratation des combinaisons d'argiles

Aux températures allant de 150 à 400°C, l'eau présente dans les combinaisons d'argiles est extraite, ce qui provoque la déshydratation de la matière.

I.4.3.4 Décarbonatation du $MgCO_3$

Aux températures allant de 400 à 500 °C, le carbonate de magnésium se décompose en magnésie et en dioxyde de carbone (CO_2), qui se dégagent et se mélangent aux gaz du four.

I.4.3.5 Décarbonatation du $CaCO_3$

Aux températures de 700 à 900 °C, le calcaire se décompose et libère la chaux dans la matière.

I.4.3.6 Combinaison de la chaux et de l'argile

A ce stade, la matière se compose d'éléments hydratés (S+A+F) et de chaux vive libre résultant de la dissociation du calcaire. Les réactions chimiques se produisent lentement au début en raison du faible contact entre les particules solides, puis s'accélèrent à des températures élevées en présence d'un liquide appelé fondant, cela conduit à l'agglomération des boules de clinker.

I.4.4 Clinkérisation

Aux températures supérieures à 1200°C, les différentes combinaisons d'éléments (C, S, A, F) commencent à se combiner pour former les principaux constituants du clinker, tels que C3S, C2S, C3A et C4AF.

Les réactions de clinkérisation sont complètes vers environ 1450 °C. Dans un four rotatif, long cylindre tournant de 1,5 à 3 tours/minute et légèrement incliné.



Figure 0-3. Photographie montrant la zone de cuisson du clinker

I.4.5 Broyage du clinker

Le clinker refroidi est finement broyé pour obtenir une poudre fine, qui est le ciment Portland. Le clinker est mélangé avec une petite quantité de gypse (sulfate de calcium) avec 3 à 5% pour contrôler le temps de prise du ciment.

I.4.6 Produit final (ciment)

Le ciment issu du broyage est conservé en silo un certain temps puis conditionné pour l'expédition en sac, en containers ou en vrac (wagon, camion, péniche).

II. Chapitre II

Ajouts cimentaires

II.1 Ajouts cimentaires

L'utilisation des ajouts minéraux dans la production des ciments Portland a résolu une grande partie du problème d'autosuffisance nationale en ciments, ainsi que celui de la baisse du coût énergétique. En faisant varier les pourcentages d'ajouts, on pourrait obtenir en fonction des domaines d'utilisation, différents types de ciments avec les propriétés physicomécaniques demandées.

Les ajouts minéraux sont largement utilisés dans la production des ciments à travers le monde. Du point de vue économique, ils présentent un facteur très important dans la production du ciment, du moment que la consommation en clinker baisse en fonction du taux d'ajout utilisé.

II.2 Définition

C'est des poudres fines actives ou inertes ajoutées au ciment pour réduire le coût de production, diminuer les émissions de CO₂ et améliorer les propriétés du béton et du mortier tels que la résistance, la durabilité, la plasticité et la performance à long terme.

Ces ajouts cimentaires sont généralement utilisés en combinaison avec le ciment Portland dans des proportions spécifiques, selon les exigences du projet et les normes applicables.

II.3 Classification

Les ajouts minéraux dans le ciment sont classés en actifs et inertes. On distingue quatre classes d'ajouts minéraux :

II.3.1 Ajouts minéraux actifs

II.3.1.1 Cendres volantes

Les cendres volantes constituent un produit minéral pulvérulent résultant du dépoussiérage des fumées rejetées par les centrales thermiques qui utilisent du charbon broyé comme combustible. Elles possèdent la propriété d'être pouzzolaniques (cendres volantes silico-alumineuses) provoque, en présence de la chaux, la formation de composés ayant des

propriétés liantes comparables à celles d'un liant hydraulique [13].

Les cendres volantes sont sous forme de particules sphériques vitreuses, pleines ou creuses. La granulométrie s'échelonne de 1 à 200 μm et, en général, 50% des particules ont un diamètre inférieur à 30 μm . Leur surface spécifique Blaine varie entre 250 et 400 m^2/kg (domaine analogue à celui des ciments).

II.3.1.2 Laitiers de haut fourneau

Les laitiers de haut-fourneau ou laitiers broyés ce sont des sous-produits de fonte qui sont refroidis soudainement par injection l'eau. 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.[20]

II.3.1.3 Fumée de silice

La fumée de silice est constituée de particules très fines (taille moyenne des particules d'environ 1 μm) à très haute teneur en silice amorphe. Ils proviennent de la réduction quartz de haute pureté alimenté au charbon dans des fours à arc électrique utilisés pour produire de silicium et d'alliage de Ferro-silicium.[19]

II.3.1.4 Pouzzolane (Z)

Les pouzzolanes sont exploitées pour la production des ciments composés. Ce sont des matériaux naturels ou artificiels riches en silice et en alumine capables de réagir avec la chaux en présence de l'eau et de former à l'issue de cette réaction des produits manifestant des propriétés liantes. [17]

II.3.1.5 Pouzzolane naturelle

C'est un produit d'origine volcanique essentiellement composé de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant naturellement des propriétés pouzzolaniques. Elle peut exister sous

forme de ponce, rhyolite, tufs, zéolite ou d'origine sédimentaire sous forme de terres à diatomées ou diatomites.

II.3.1.6 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. Les roches traitées thermiquement sont de types argiles, schistes, latérite et bauxite.[18]

II.3.1.7 Fillers calcaires

Les produits désignés dans le commerce comme fillers sont des poudres fines à granulométrie contrôlée, dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 microns obtenus par broyage ou par pulvérisation de certaines roches (calcaires, basalte, bentonite, cendres volantes ...).

Les fillers se différencient les uns des autres par :

- Leur origine, leurs compositions chimiques et minéralogiques, leurs défauts de structure, les impuretés qu'ils contiennent.
- Leur finesse, la forme des grains.
- 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.
- Un rôle rhéologique par leur pouvoir fluidifiant sur la pâte interstitielle.
- Un rôle chimique et physique conduisant à l'accélération de l'hydratation du C3S et du C3A et à la formation de carbo-aluminates : germes de cristallisation et points d'ancrage des hydrates.
- Un rôle physique en permettant un arrangement initial différent ce qui réduit l'épaisseur entre la pâte et le granulat. [19]

II.4 Propriétés et caractéristiques [23]

Les pouzzolanes sont des roches " acides " ayant des teneurs élevées en silice et en alumine (Entre 70 et 80% pour les deux composants ensemble), puis en fer, en alcalins, en magnésie et en chaux. Les pouzzolanes naturelles d'origine sédimentaire ont des teneurs en silice encore plus élevées.

Les quantités de chaux sont limitées, ce qui explique par ailleurs, la capacité des pouzzolanes à fixer la chaux.

Les pouzzolanes sont formées surtout d'éléments vitreux. Elles sont plus au moins réactive. La réactivité est l'aspect chimique de fixation de la chaux.

L'activité pouzzolanique s'explique par une attaque lente de la silice et de l'alumine des pouzzolanes par l'hydroxyde de chaux (Portlandite).

Des tests chimiques basés sur la quantité de chaux absorbée ou sur la vitesse de fixation ne suffisent pas pour déterminer la réactivité pouzzolanique.

D'autre part, la connaissance séparée des propriétés de chacun des constituants ne permet pas de prévoir le comportement des mélanges. Seuls les résultats des essais de l'évolution des résistances mécaniques dans le temps permettent de conclure. Tous les matériaux appelés « pouzzolanes » ne possèdent pas forcément cette propriété.

On peut, dans certains cas, activer les pouzzolanes par certains procédés :

- Ajouts de produits chimiques.
- Broyage à une finesse plus élevée.
- Traitement thermique.

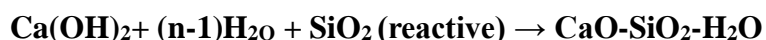
II.4.1 Propriétés hydrauliques

La pouzzolane réagit avec l'eau, en présence d'une quantité suffisante de chaux, pour former des hydrates stables, peu solubles et résistants à long terme.

II.4.2 Propriétés physiques de remplissage

En plus de leur effet pouzzolaniques, elles jouent un rôle de remplissage des pores des produits hydratés et de correcteurs granulaires, ce qui améliore la compacité et diminue la perméabilité.

Les ciments aux pouzzolanes sont obtenus en mélangeant le produit pouzzolanique finement broyés avec le portland.



II.5 Utilisation des ajouts en Algérie

L'industrie cimentaire est d'importance primordiale pour l'Algérie comme tous pays en voie de développement. Cependant, parmi les moyens efficaces qui existent pour augmenter la production du ciment est celui d'utiliser des ajouts qui sont très peu coûteux et disponibles en grandes quantités en Algérie, comme le laitier d'El – Hadjar, le calcaire et la pouzzolane naturelle de Béni – Saf. [21]

Tableau 0-1. Utilisation des ajouts dans les cimenteries algériennes [21]

Entreprise	Cimenterie	Ajouts utilisés
	Ain Touta	Laitier + Calcaire
	Ain ElKebira	Laitier + Pouzzolane
	Hamma Bouziane	Laitier + Calcaire
	Hadjar Essaoud	Laitier
	Tebessa	Laitier
	Meftah	Tuf / Calcaire
	Raïss Hamidou	Poussière
	Soue EL Ghozlane	Tuf / Calcaire
ECDE	Chelef	Calcaire
	Béni Saf	Pouzzolane
	Zahana	
	Saida	

II.6 Avantages de l'utilisation des ajouts minéraux [21]

II.6.1 Bénéfices fonctionnels

Incorporation des particules fines améliore la maniabilité et réduit la demande en eau (à l'exception des ajouts d'une grande finesse).

Prise et durcissement pour les ajouts qui interviennent dans le processus réactionnel du ciment avec l'eau.

Il y a une amélioration des propriétés mécaniques et de la durabilité du béton.

Il y a une diminution de la chaleur d'hydratation dégagée du béton, ce qui diminue la fissuration d'origine thermique.

II.6.2 Bénéfices économiques

La plupart des ajouts minéraux sont des sous-produits de différentes industries et leur coût est souvent égal au coût du transport et de la manipulation.

Comme la production du ciment est un grand consommateur d'énergie, son remplacement par des ajouts minéraux réduit le prix du béton pour le coût du combustible.

II.6.3 Bénéfices écologiques et environnementaux

Diminution de l'émission du (CO_2) par l'industrie cimentière.

Élimination des sous-produits de la nature.

II.7 Hydratation du ciment

II.7.1 Réactions d'hydratation

La complexité des réactions qui se produisent dès le début du gâchage et qui se prolongent dans le temps est très grande.[24]

Les différents minéraux qui constituent le clinker interagissent avec l'eau. Simultanément et, en se superposant. Les formations nouvelles obtenues peuvent à leur tour interagir entre elles et avec les minéraux de départ du clinker, créant ainsi de nouveaux composés. Cela pose des problèmes pour l'analyse du durcissement du ciment portland.

Le C3S s'hydrate rapidement et est largement responsable de la prise et du durcissement de la

pâte ; le C3S assure la résistance initiale.

Le C2S s'hydrate lentement, il est responsable du gain en résistance à long terme (une semaine et plus).

Le C3A s'hydrate très rapidement, et libère beaucoup de chaleur dans les premiers jours, et contribue légèrement à la résistance initiale.

Le C4AF s'hydrate lentement et contribue peu à la résistance mécanique. Le sulfate de calcium est ajouté au broyage pour contrôler l'hydratation du C3A par la formation de composés moins réactifs (ettringite, sulfoaluminates). [25]

Sans le gypse, le ciment contenant du C3A fait prise trop rapidement.



Figure 0-1. Schéma montrant la couche protectrice d'ettringite [22]

Les quatre principaux constituants anhydres donnent en présence d'eau, naissance à des silicates et aluminates de calcium hydratés pratiquement insolubles dans l'eau.

Lorsque le ciment portland est mélangé avec de l'eau, il se produit plusieurs réactions chimiques qui sont plus ou moins rapides.

Ces réactions font intervenir les différents constituants du ciment, ce dernier est composé de quatre phases minéralogiques principales qui représentent 90% ou plus de la masse du ciment : le C3S, le C2S, le C3A et le C4AF.

Le silicate tricalcique (C3S) est la phase la plus abondante du ciment, elle représente entre 50 et 70% de la masse du ciment.

Le silicate tricalcique est aussi appelé alite. Lorsque celui-ci réagit avec l'eau, la réaction chimique est très rapide et les produits de la réaction durcissent rapidement.

L'alite est en grande partie responsable de la prise et de la résistance initiale du béton.

En général, plus la teneur en alite d'un béton de ciment portland est élevée, plus la résistance initiale est grande. L'équation de la réaction chimique est la suivante :[25,27]

Alite + Eau \rightarrow silicate de calcium hydraté + hydroxyde de calcium



Le CH, quant à lui, est communément appelé de la portlandite. C'est une phase cristalline soluble qui représente environ 20% du volume de la pâte. La deuxième phase du ciment anhydre est appelé bélite qui est en fait du silicate bicalcique (C2S). Elle constitue entre 15 et 30 % de la composition du ciment.

Tout comme l'alite, la bélite produit des CSH et du CH lorsqu'elle réagit avec l'eau. La réaction chimique est par contre beaucoup plus lente que celle de l'alite.

La bélite contribue en grande partie à la résistance développée au de la d'une semaine. L'équation de la réaction chimique entre la bélite et l'eau est la suivante :[28]

Bélite + eau \rightarrow silicate de calcium hydraté + hydroxyde de calcium



L'aluminate tricalcique (C3A) est la troisième phase du ciment. Elle constitue entre 5 et 10% de la composition du ciment.[26]

Lors de la réaction chimique, le C3A libère une grande quantité de chaleur durant les premières minutes de l'hydratation et il contribue légèrement à l'accroissement de la résistance initiale du matériau. La réaction chimique est plus compliquée que celle de l'alite et de la bélite puisqu'elle se réalise en deux étapes.

Premièrement, le C3A réagit avec l'eau et le gypse pour former de l'ettringite (AFt).

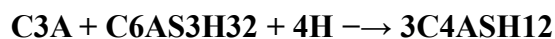
Une fois l'ettringite formée, celle-ci réagit avec le C3A toujours disponible pour former des mono sulfoaluminates de calcium (ou AFm).

Les deux équations chimiques sont les suivantes :[26]

Etape 1 : aluminate tricalcique + gypse + eau \rightarrow ettringite



Etape 2 : aluminate tricalcique + ettringite + eau \rightarrow mono sulfoaluminate de calcium



La dernière phase principale du ciment est l'aluminoferrite tétracalcique (C4AF). C'est le produit qui résulte de l'utilisation des matières premières contenant du fer et de l'aluminium pour abaisser la température de la clinkérisation pendant la fabrication du ciment. L'hydratation du C4AF est initialement assez rapide, mais elle s'arrête rapidement et contribue très peu à la résistance mécanique du béton. La réaction chimique est la suivante :

aluminoferrite tétracalcique + hydroxyde de calcium + eau → aluminoferrite de calcium hydraté :

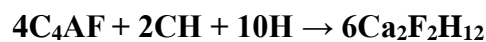


Tableau 0-2. Composition minéralogique du ciment [18]

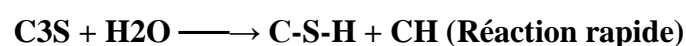
Composés	Composition	Appellation abrégée	Taux %
Silicate tricalcique	3 CaO.SiO ₂	C ₂ S	45 à 65
Silicate tricalcique	2 CaO.SiO ₂	C ₃ S	15 à 35
Aluminate tricalcique	3 CaO.Al ₂ O ₃	C ₃ A	4 à 14
Aluminoferrite tricalcique	3 CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₄ AF	10 à 18

II.7.2 Hydratation et réaction pouzzolaniques

La composition des pouzzolanes est similaire à celle du ciment portland, mais avec des proportions et une composition minéralogique différentes. Ils contiennent une forte quantité de dioxyde de silicium, ou de dioxyde de silicium et d'oxyde d'aluminium combinés, et ils sont volatils.

Les ciments portland sont peu riches en CaO, ce qui est le contraire.

Les pouzzolanes ont une réaction pouzzolanique. Cela signifie qu'en présence d'eau et d'hydroxyde de calcium, elles se transforment en silicate de calcium et aluminate de calcium hydraté développant des résistances :[29]



Pouzzolane + Ca(OH)₂ + Eau => silicates de calcium hydratés, silico-aluminates de calcium hydratés (Réaction lente)

La composition et la structure de ces composés sont pareilles à celles des produits d'hydratation du clinker portland (CSH, C4AH13, C8AFH26, C6AS3H32).

Les mécanismes de cette formation sont toutefois très divers. Ils sont représentés d'une manière très simplifiée dans les figures II-2 et II-3 suivantes :

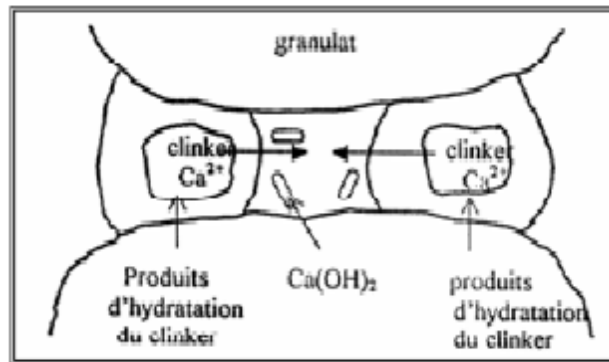


Figure 0-2. Schéma montrant l'hydratation du clinker de ciment Portland [18]

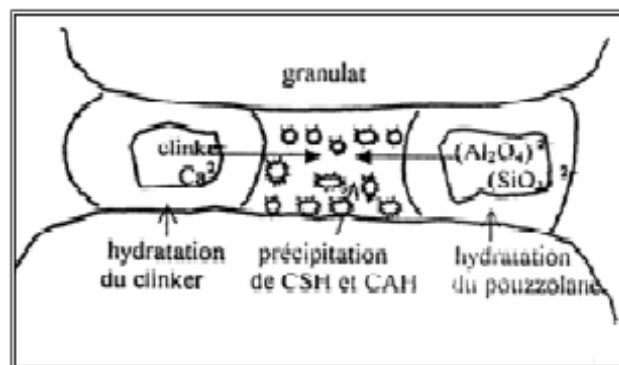


Figure 0-3. Schéma montrant l'hydratation du ciment à la pouzzolane[18]

III. Chapitre III

Matériel et Méthodologie Expérimentale

III.1 Introduction

Afin de mettre en évidence l'influence des ajouts minéraux sur les propriétés chimiques et physico-mécaniques des mortiers de ciment préfabriqués, des essais physiques, chimiques, minéralogiques et mécaniques ont été réalisés dans les laboratoires suivants :

- Laboratoire des matériaux pavillon 22 Université Blida 1.
- Laboratoire physique de la cimenterie de Meftah.
- Laboratoire chimique de la cimenterie de Meftah.

III.2 Contrôle de qualité

Le contrôle de qualité consiste à assurer la qualité de la production d'un produit au sein du SCMI (Société des Ciments de la Mitidja), où le laboratoire assure la perfection de la production, en se basant sur la production en carrière à l'ensachage 24 heures sur 24, 7 jours sur 7 dans la salle de contrôle.

C'est pourquoi SCMI a établi depuis longtemps des procédures de contrôle rigoureuses afin de garantir la qualité des produits et la réputation de l'entreprise [7].

III.3 Analyses chimiques

III.3.1 Matériel et produits utilisés

Les analyses chimiques permettent d'étudier la composition du ciment. Pour réaliser ces analyses, différents matériaux et produits sont utilisés comme le montre le Tableau III-1 suivant.

Tableau 0-1. Matériel et produit utilise dans les analyses chimiques

Matériel et Produits utilisés		Pureté
Papier filter	Dessiccateur	-
Verre à montre	Four à moufle 975 ± 25°C	
Balance de précision	Filtre rapide	
Eprouvette	Agitation magnétique	
plaque chauffante	Bêcher 250 m L	
Verre de montre.	Pipette 10cc à 2 traits de jauge	
Eau distillée		
HCl		
Chlorure de Barium		50%
Ciment		100 g/L

III.3.2 Détermination de la chaux libre par une acidimétrie

Cette méthode a pour objectif de déterminer le pourcentage de la chaux libre par une acidimétrie des différentes matières.

La méthode consiste à effectuer les opérations suivantes :

- Séchage à 110 °C d'une quantité de 1 g ± 0,1 de l'échantillon
- Broyage à 800 tr/min pendant 3 minutes
- Récupération de la quantité pesée dans un flacon Erlenmeyer de 250 mL.
- Mélange avec 50 mL d'éthylène glycol
- Agitation vigoureuse du mélange puis chauffage dans un bain-marie à 80°C.
- Filtration sous vide et récupération du été titré avec une solution de HCl 0,1 N en présence de bleu de bromothymol.
- Lecture du volume V correspondant au changement de couleur.

Expression des résultats :

$$\% \text{ CaO (I)} = \text{F. V (HCl)}$$

F : facteur de la Solution

III.3.3 Détermination du SO₃

Ce mode opératoire décrit comment déterminer le pourcentage du SO₃ par turbidimètre et par gravimétrie. Il consiste à effectuer les opérations suivantes :

- Mélange 0.2 g avec 25 mL d'eau distillée dans un bécher de 250 mL
- Ajout sous agitation de 5mL d'HCl à 50% au mélange précédent
- Chauffage à ...°C jusqu'à ce que le liquide soit jaune clair
- Refroidissement puis mélange avec de l'eau distillée jusqu'à l'obtention d'un volume de 200 mL
- Pesage 0.2g (0.01mg de l'échantillon).
- La mettre dans un bêche de 250mL.
- Délayer avec 25ml d'eau distillée.
- Après refroidissement de la solution, il faut compléter à 200mL.
- Ajouter 10 mL de BaCl₂ à 100g/l mesuré avec éprouvette graduée.
- Agitation pendant 5min.
- Dans le cas du gypse, un séchage préalable de la matière à 60°C [7]

III.3.4 Détermination de la perte au feu PAF

Ce mode opératoire a pour objet de définir la procédure à suivre pour déterminer la perte au feu dans les différentes matières. Le processus décrit implique les points suivants :

- Pesage de le creuset vide, ajouter une quantité spécifique de ciment
- Pesage à nouveau de creuset avec le ciment, puis le placer dans un four à 975°C pendant 5 minutes.
- retirer le couvercle et laisser le creuset dans le four pendant encore 15 minutes.
- Après 20 minutes au total, sortir le creuset du four et le placer dans un dessiccateur jusqu'à ce qu'il atteigne la température ambiante.
- Il est mentionné que le couvercle peut être retiré pour certaines expériences si une étude démontre qu'il n'y a pas de différence significative avec ou sans couvercle.
- Un pesage à nouveau de creuset après le processus est indispensable.

Expression des résultats :

$$\% \text{ PF} = (M2 - M3) * 100 / (M2 - M1)$$

M1 : masse Creuset

M2 : masse de creuset + produit

M3 : masse de creuset +Produit après calcination

III.4 Analyses physicomécaniques

Les analyses physicomécaniques sont des tests utilisés pour étudier les propriétés des matériaux de construction, tels que le ciment composé.

III.4.1 Matériel et produits utilisés

Les analyses psychomécaniques sont des tests utilisés pour étudier les propriétés des matériaux de construction, tels que le ciment composé. Pour effectuer ces tests, on utilise le matériel et les différents produits rassemblés dans le Tableau III-3 suivant.

Tableau III-3. Matériel et produits utilisés dans les analyses physicomécaniques

Matériel et Produits utilisés	
Balance de précision	Spatule
Verre de montre	Malaxeur
Tamis	Appareil à chocs
Moules	Matières à analyser (ciment composé)
Liant	Sable normal sec
Eau distillée	

III.4.2 Mesure des refus par tamisage ALPINE

Ce mode opératoire a pour but de décrire la démarche à suivre pour déterminer les refus par tamisage ALPINE.

- Connexion de tamiseur au bouton d'allumage à l'arrière de l'appareil alpin.
- Insérer le tamis sur le carter et peser $10g \pm 0.2g$ de produit à tamiser.
- Disperser la masse du produit sur le tamis et poser le couvercle.

- lancement de tamisage avec un temps de 1min (2000Pa) en appuyant sur la touche 1, puis sur la touche "Timer".
- Après la fin du tamisage, appuyer sur la touche "stop". Démontez le couvercle et pesez le refus "m".

Calculer le refus par cette équation : $\% \text{Refus} = m \cdot 10$

III.4.3 Essai par compression

Ce mode opératoire décrit les modalités de réalisation des essais mécaniques sur ciment conformément à la norme NA 442/2000.

III.4.3.1 Préparation des éprouvettes

Ce mode opératoire a pour but de décrire les étapes à suivre pour préparer les éprouvettes 4*4*16.

III.4.3.1.1 Pesée des constituants

Le mortier normal se compose d'une partie du liant à essayer, de trois parties de sable normal et d'une demi - partie d'eau (règle E/C = 0.5). Les constituants sont pesés avec une précision de 0.5%.

Dans le cas de préparation de trois éprouvettes 4*4*16, les quantités sont respectivement les suivantes :

Sable normal sec : 1350 g

Liant : 450 g

Eau : 225 g

III.4.3.1.1.1 Malaxage

Le mélange doit être effectué au moyen d'un malaxeur tel que spécifié dans la norme algérienne NA 442/2000.

Le malaxeur étant en position de fonctionnement, il faut:

- Verser de l'eau dans le récipient puis ajouter le liant.

- lancer le malaxage avec une vitesse lente pendant une minute et introduire le sable dans les 30 dernières secondes,
- Mettre le malaxeur à la vitesse rapide pendant 2 minutes.
- Arrêter de mouvement pendant 90s ; Avec le batteur démonté de son axe, racler les parois et le fond du récipient de façon qu'aucune partie du mortier n'échappe au malaxage.
- Après remontage du batteur, reprendre le malaxage pendant 2 mn à vitesse rapide.

III.4.3.1.1.2 Moulage

Les éprouvettes sont moulées au moyen de l'appareil à chocs, décrit dans la norme algérienne NA 442/2000 conformément au mode opératoire suivant :

- Malaxage de mélange – mortier - étant terminé
- Disposition celui - ci sur une plaque non réactive au liant et non absorbante ;
- Formation d'une galette approximativement rectangulaire,
- La partager en 6 fractions sensiblement égales.
- Le moule ayant été muni de sa hausse, le fixer sur la table à chocs ; introduire dans chacun des 3 compartiments une fraction de la galette ;
- Egaliser la surface du mortier au moyen de la raclette maintenue verticale,
- Déplacer dans un double aller et retour en prenant appui sur le bord supérieur de la hausse.
- Mettre la machine en marche pour 60 chocs.
- Recommencer les mêmes opérations pour la deuxième couche.
- Après 60 nouveaux chocs, le moule et la hausse sur une faible hauteur sont remplis de mortier.
- Le moule étant retiré de la machine et débarrassé de sa hausse.
- Araser le mortier avec l'arête d'une règle métallique plate maintenue verticale par un mouvement de scie de faible amplitude et perpendiculaire à la longueur des éprouvettes.
- Inscrire les marques d'identification des éprouvettes sur le moule.

III.4.3.1.1.3 Conservation des éprouvettes avant démoulage

Le moule rempli de mortier marqué et recouvert d'un couvercle (qui doit laisser un vide de l'ordre de 2 mm au-dessus de la surface des éprouvettes) est placé jusqu'au moment du démoulage dans une enceinte humide à la température de 20 ± 1 °C dont l'humidité relative aussi voisine que possible de la saturation est d'au moins 90%.

III.4.3.1.1.4 Démoulage des éprouvettes prismatiques

- Le démoulage qui intervient entre les deux périodes de conservation (avant démoulage, d'une part et conservation dans l'eau, d'une autre part) est exécuté entre 20 et 24 heures après la mise en moule.
- Toutefois, si au bout de 24 heures, le mortier n'a pas acquis une résistance suffisante pour qu'on puisse le manipuler sans danger de détérioration, le temps de démoulage est augmenté de 24 heures, mais le compte-rendu doit le mentionner.
- Quand il s'agit d'éprouvettes à rompre à 24 heures d'âge, si le démoulage a lieu plus de 20 minutes avant l'essai, les éprouvettes doivent être remises dans l'armoire humide jusqu'au moment de l'essai.
- Le démoulage doit être effectué avec précaution.

III.4.3.1.1.5 Conservation des éprouvettes dans l'eau

La conservation des éprouvettes dans l'eau s'effectue selon les conditions suivantes :

- Une fois démoulées et marquées et éventuellement pesées, les éprouvettes sont conservées entièrement immergées dans l'eau.
- La température de l'eau servant à la conservation des éprouvettes doit être 20 ± 1 °C.
- Matières en suspension : 0.5%
- Sels dissous : 2.0 g/L
- Sulfates et sulfures exprimés en SO₃ : 1.0 g/L

III.4.3.2 Essais de rupture par compression

III.4.3.2.1 Dispositif d'essai

- Une demi – éprouvette est essayée en compression latéralement sous une section de 40 * 40mm, entre deux plaques de métal dur.
- Les plaques possèdent les caractéristiques suivantes : 10mm d'épaisseur, de 40mm ± 0.1 mm de largeur, de longueur supérieure à 40 mm et dont la tolérance de planitude est de 0.01 mm.
- Ces plaques sont en acier dur d'une dureté Vickers d'au moins 600, ou de préférence en carbure de tungstène.
- La demi- éprouvette est placée entre elles de manière que son extrémité intacte dépasse d'au moins 1 cm et que les arêtes longitudinales de l'éprouvette soient perpendiculaires à celles des plaques.
- Les plaques sont guidées sans frottement appréciable au cours de l'essai, de manière à avoir la même projection horizontale. L'une d'elles peut s'incliner légèrement pour permettre le contact parfait plaques -- faces de l'éprouvette.

III.4.3.2.2 Machine d'essai

L'ensemble du dispositif et de l'éprouvette est placé entre les plateaux d'une presse répondant aux spécifications des presses destinées à l'essai de compression des matériaux durs. Il y est placé de telle façon que l'axe des sections de compression soit centré sur la rotule du plateau supérieur.

III.4.3.2.3 Conduite de l'essai

La charge doit croître jusqu'à la rupture à une vitesse telle que l'accroissement de contrainte soit compris entre 1 et 2 MPa/s. toutefois, jusqu'à la moitié de la charge de rupture présumée, la charge peut croître rapidement.

IV. Chapitre IV

Résultats et Discussion

IV.1 Synthèse du ciment

Notre travail consiste à préparer une série de plusieurs ciments ternaires à base de pouzzolane et de calcaire e variant les pourcentages de ces ajouts.

IV.2 Analyse chimique des matières premières

Les essais de composition du ciment ont été effectués au niveau du laboratoire de la SCMI. Le calcul de la composition minéralogique du Matériaux est basé principalement sur les analyses de XRF.

Les tableaux IV-1, IV-2, IV-3, IV-4expriment la composition chimique et minéralogique des matériaux utilisés dans le mélange.

Tableau 0-1. Composition minéralogique du calcaire

Composé	Valeur	Unité
SiO ₂	1,24	%
Al ₂ O ₃	0,45	
Fe ₂ O ₃	0,25	
CaO	54,3	
MgO	0,72	
SO ₃	0,1	
K ₂ O	0,05	
Na ₂ O	0,06	

Tableau 0-2. Composition minéralogique de clinker

Composé	Valeur	Unité
SiO ₂	21,68	%
Al ₂ O ₃	5,31	
Fe ₂ O ₃	3,62	
CaO	65,64	
MgO	0,91	
SO ₃	0,24	
K ₂ O	0,51	
Na ₂ O	0,17	
C3S	60,95	
C2S	16,15	
C3A	7,95	
C4AF	11	

Tableau 0-3. Composition minéralogique de pouzzolane

Composé	Valeur	Unité
SiO ₂	45,21	%
Al ₂ O ₃	17,85	
Fe ₂ O ₃	9,84	
CaO	9,99	
MgO	4,38	

Tableau 0-4. Composition minéralogique du gypse

Composé	Valeur	unite
SiO ₂	5,81	%
Al ₂ O ₃	1,83	
Fe ₂ O ₃	0,84	
CaO	31,14	
MgO	3,9	
SO ₃	35,53	
K ₂ O	0,3	
Na ₂ O	0,46	

IV.3 Préparation des constituants du ciment

Pour obtenir le ciment, les matières premières telles que le clinker, le calcaire, la pouzzolane et le gypse sont préparées en passant par des étapes de séchage, concassage, broyage et tamisage.

IV.3.1 Séchage

Essaye effectuée dans une étuve de séchage à la température variant entre [80°C _ 110 °C] pendant 1 heure de temps, pour éliminer l'humidité présente dans les matériaux.

L'humidité peut affecter le broyage ou la résistance, la durabilité et la stabilité des matériaux.

IV.3.2 Concassage

Un mini concasseur est utilisé pour minimiser la taille et faciliter le broyage de matières : le clinker, calcaire, pouzzolane et le gypse.

Les matériaux sécher sont réduits à une taille inférieure à 80 mm dans le concasseur.

IV.3.3 Broyage

Le broyage est effectué en mode discontinu dans une cuve cylindrique en acier de diamètre interne de 17,15 cm et longueur 21cm pour avoir des poudres fines, à l'aide d'un mini-broyeur

à boulets.

Elle est mise en rotation à une vitesse de rotation de 40 révolutions/min La fragmentation du matériau introduit dans le cylindre de 2KG se produit sous l'effet des chocs et des frottements entre boulets et matière.

IV.3.4 Tamisage

Le tamisage est effectué sur une tamiseuses vibrantes sur un tamis de diamètre 75 micro afin d'obtenir le diamètre requis. L'amplitude sur 0.90 mm/g

IV.4 Préparation du ciment

Après avoir terminé la première partie de la préparation des composants du ciment, nous commençons à préparer 4 types de ciment variant dans la proportion de calcaire (soit 45,40, 35 ou 30%) et de pouzzolane (soit 10,15, 20 ou 25%).

Le clinkera 40% et le gypse à5%.

La composition du ciment préparé est indiquée dans le tableau IV-5 suivant.

Tableau 0-2. Différents ciments préparés

Cimentspréparés	Code	Clinker	Calcaire	Gypse	Pouzzolane
		%			
Produit 1	(P10C45)	40	45	5	10
Produit 2	(P15C40)	40	40	5	15
Produit 3	(P20C35)	40	35	5	20
Produit 4	(P25C30)	40	30	5	25

IV.5 Résultats d'analyse chimique

IV.5.1 Perte au feu

La mesure de la perte au feu dans l'analyse du ciment est réalisée pour évaluer sa composition chimique, contrôler sa qualité, prédire son comportement à haute température et assurer sa conformité réglementaire.

Elle permet de déterminer la teneur en eau, en CO₂ et en matières organiques volatiles présentes dans le ciment, fournissant ainsi des informations précieuses sur sa composition.

Le tableau IV-6 suivant présente les résultats obtenus concernant la variation de la PAF en fonction des mélanges préparés :

Tableau 0-3. Résultats de PAF pour chaque mélange

Mélange	P10C45	P15C40	P20C35	P25C30
PAF(%)	21,33	19,87	18,42	17,22

IV.5.1.1 Interprétation des résultats

Les résultats indiquent que si on diminue le pourcentage de calcaire et qu'on augmente le pourcentage de pouzzolane, la PAF diminue. L'effet du calcaire est dû au fait qu'il contient des composants qui peuvent réagir à une température inférieure à 950°C.

Les plus importants de ces composants sont les composés MgCO₃ et CaCO₃, alors que la pouzzolane n'a aucun effet car elle est stable thermiquement.

IV.5.2 Chaux libre

La mesure de la chaux libre dans le ciment est importante pour évaluer sa qualité et ses propriétés.

La chaux libre est l'excès de chaux non réactive dans le ciment. Un excès de chaux libre peut entraîner une diminution de la résistance, une augmentation de la porosité et de la perméabilité à l'eau, ce qui compromet la durabilité du matériau.

Cela permet d'obtenir des performances optimales et de prévenir les problèmes tels que les fissures et la dégradation prématurée.

Le tableau IV-7 suivant exprime la variation de la chaux libre en fonction des mélanges préparés :

Tableau 0-4. Résultats de la chaux libre

Mélange	P10C45	P15C40	P20C35	P25C30
CaOlibre (%)	0,33	0,35	0,35	0,38

IV.5.2.1 Interprétation des résultats

Les résultats obtenus montrent qu'un changement des quantités des ajouts de pouzzolane et de calcaire dans le mélange n'a aucune influence sur la quantité de chaux libre.

La teneur en chaux libre dans le ciment est un indicateur de la qualité et de la cuisson adéquate du clinker. Ces résultats peuvent être justifiés par le fait que ce paramètre est lié directement au clinker, et donc que les ajouts ne possèdent pas d'influence sur les résultats.

IV.5.3 Détermination du SO₃

La mesure du SO₃ dans le ciment est effectuée pour contrôler la quantité de sulfate présente dans le matériau. Un excès de SO₃ peut causer une expansion sulfatique, entraînant des problèmes tels que les fissures et la perte de résistance.

Les normes sur les ciments fixent des limites pour la teneur en SO₃, généralement comprises entre 2 et 4%.

Le Tableau IV-8 suivant exprime la variation du pourcentage de SO₃ en fonction des mélanges préparés :

Tableau 0-5. Résultats des pourcentages de SO₃

Mélange	P10C45	P15C40	P20C35	P25C30
SO ₃ (%)	2,58	2,66	2,92	3,02

Les résultats indiquent que les ajouts de calcaire et de pouzzolane n'ont pas d'impact significatif sur le pourcentage de SO₃ dans les mélanges étudiés.

Le SO₃ provient principalement des sulfates (gypse, anhydrite, etc.) ajoutés lors de la mouture du clinker pour réguler la prise du ciment

IV.6 Résultats des analyses physiques

IV.6.1 Refus par tamisage ALPINE

Le tamisage du ciment est une technique utilisée pour évaluer la distribution granulométrique des particules de ciment. Le refus de ciment, peut avoir plusieurs influences sur le ciment.

Un refus de ciment élevé peut compromettre sa résistance et réduire sa durabilité, il peut également influencer l'adhérence du ciment à d'autres matériaux.

Le tableau IV-9 suivant présente les pourcentages de refus dans les mélanges préparés :

Tableau 0-6. Pourcentages de refus en fonction des mélanges.

Mélange	P10C45	P15C40	P20C35	P25C30
Refus(%)	16,01	16,09	16,5	16,8

Suite aux résultats obtenus, on a constatés que les différents types de broyage peuvent influencer sur la qualité des matériaux et la performance globale du processus.

Le pourcentage de refus varie en fonction de la méthode de broyage utilisée, ce qui signifie l'absence d'un 'impact spécifique lors de la modification des quantités d'ajouts.

IV.6.2 Essai par compression

Les essais par compression de ciment sont réalisés dans le but d'évaluer la résistance du matériau.

Ils permettent de mesurer la capacité du ciment à supporter des charges de compression, d'optimiser les mélanges en étudiant l'impact des modifications sur sa résistance et de vérifier sa performance dans des conditions réelles.

Tableau 0-7. Résistance de compression des mélanges préparés

Mélange	Test	2 jours	7jours	28 jours
		α (N/mm ²)		
P10C45	1	6,8	13	18.4
	2	6,6	12,8	18.3
P15C40	1	6,6	12,8	19.3
	2	6,2	12,9	19.3
P20C35	1	6	12,9	19.9
	2	5,9	13	20.1
P25C30	1	6,1	12,8	21.1
	2	6	12,9	20.9

IV.6.2.1 Résistance initiale (2 et 7 jours)

Après une durée de deux jours le matériau ne peut pas atteindre sa résistance maximale. Les réactions chimiques nécessaires à la formation des cristaux de silicate de calcium hydraté (CSH) et à la consolidation de la structure peuvent ne pas être complètement achevées.

Par contre, après sept jours la valeur de la résistance augmente pour les quatre mélanges mais avec des valeurs constantes pour les deux tests d'un même mélange.

IV.6.2.2 Résistance de 28 jours

Lorsqu'on a diminués la quantité de calcaire et augmenter la quantité de pouzzolane dans un mélange de ciment, la résistance du mélange augmente après 28 jours.

On remarque que la présence de pouzzolane dans un mélange de ciment peut avoir plusieurs effets après 28 jours par exemple :

- Contribution à la résistance : La réaction chimique de la pouzzolane avec le ciment peut former d'avantage de cristaux de silicate de calcium hydraté (CSH), ce qui renforce la structure du matériau et augmente sa résistance.

- Amélioration de la durabilité : La pouzzolane peut réduire la perméabilité du ciment, ce qui limite la pénétration de l'eau, des ions agressifs et d'autres substances nocives. Cela améliore la résistance aux attaques chimiques, à la corrosion et aux cycles de gel-dégel.

IV.7 Préparation du deuxième ciment

Pour obtenir des résultats plus précis et confirmer certains des résultats obtenus dans le ciment précédent, nous modifions les proportions des composants utilisés dans les mélanges.

La préparation des composants du ciment et la même, nous commençons par la préparation des 4 types de ciment variant en termes de la proportion de calcaire (35, 25, 15 et 5%) et de pouzzolane (10, 20, 30 et 40%).

Le clinker est fixé à 50% et le gypse à 5%, comme indiqué dans le tableau IV-11 suivant.

Tableau 0-8. Différents ciments préparés (2eme cas)

Ciments préparés	Code	Clinker	Calcaire	Gypse	Pouzzolane
		%			
Produit 1	(P10C35)	50	35	5	10
Produit 2	(P20C25)	50	25	5	20
Produit 3	(P30C15)	50	15	5	30
Produit 4	(P40C5)	50	5	5	40

IV.8 Comparaison des résultats des analyses chimiques

Cette partie est dédiée à la comparaison entre les résultats obtenus lors de la réalisation des analyses chimiques élaborés dans les deux cas.

IV.8.1 Perte au feu

Les représentations graphiques IV-1 suivantes permettent d'avoir l'influence des ajouts sur les valeurs de perte au feu.

Les résultats du deuxième cas montrent que la valeur de PAF est décroissante de 17.32 % jusqu'à 8.07 %. Par contre une légère diminution est enregistrée dans le premier cas de 21.33%

jusqu'à 17.22%. On constate aussi que chaque fois le calcaire est présent avec des faibles quantités, la PAF est également faible.

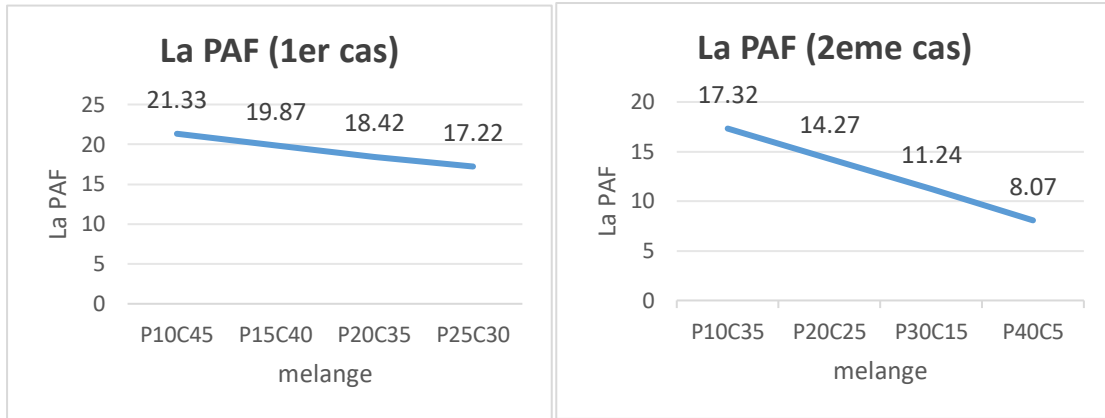


Figure 0-1. Resultats de la PAF dans les deux cas

IV.8.2 Chaux libre

Les représentations graphiques IV-2 suivantes permettent d'exprimer l'influence des ajouts sur les pourcentages de CaO libre dans les deux cas.

Les valeurs de CaO libre varient entre 0.33% et 0.38 % dans les deux cas, parce qu'ils sont constitués de même clincker.

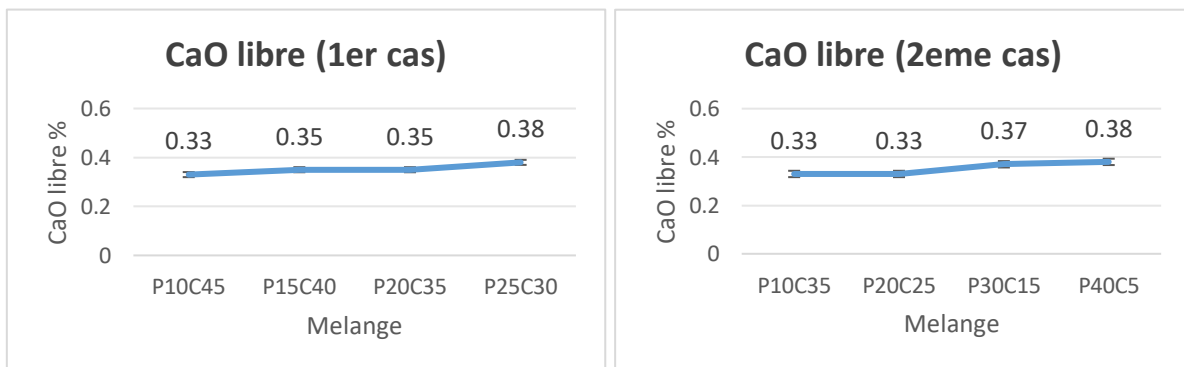


Figure 0-2. Pourcentage de la CaO libre dans les deux cas

IV.8.3 Détermination du SO₃

Les représentations graphiques IV-3 suivantes permettent d'avoir l'influence des ajouts sur les pourcentages de SO₃ dans les mélanges des deux cas.

Suite aux ces résultats, les pourcentages s'varient entre (2 et 4%), s'approuve que l'existence de SO₃ dans les mélanges est lies directement avec le gypse.

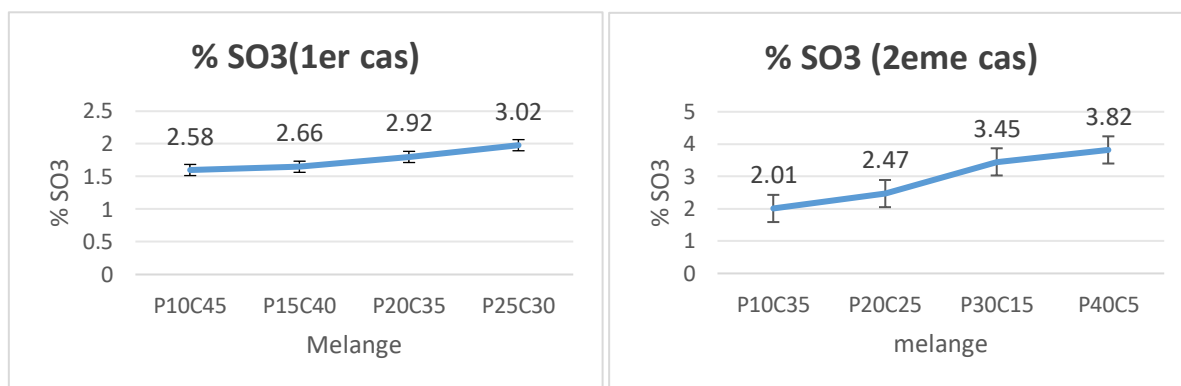


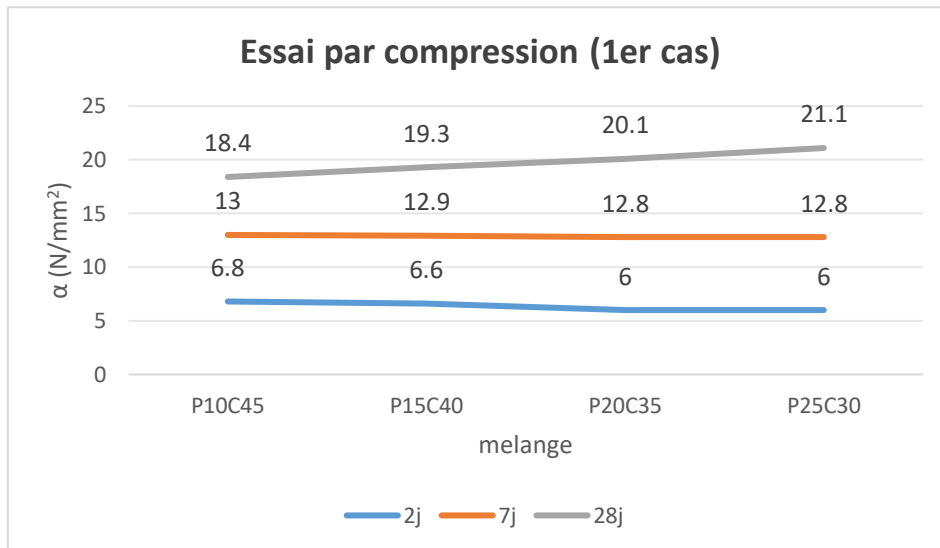
Figure 0-3. Pourcentage de SO₃ dans les deux cas

IV.9 Comparaison des résultats d'analyses physiques

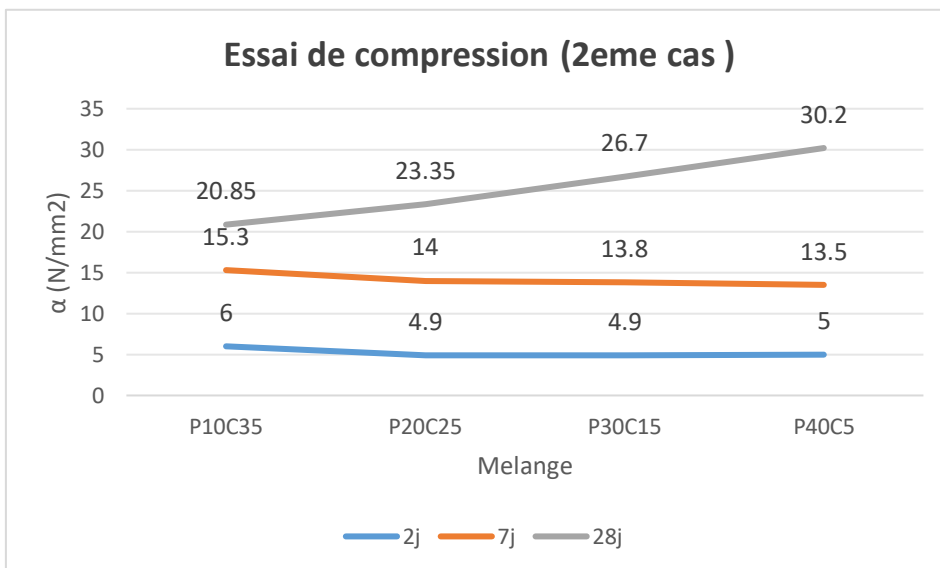
IV.9.1 Essai par compression

Les deux Figures IV-4 et IV-5 présentent une étude comparative entre les résultats d'essai par compression entre les deux cas.

Nous remarquons une augmentation intéressante des valeurs de la résistance enregistrées dans les essais de 28 jours, ce qui est plus clair dans le 2 eme cas avec une augmentation jusqu'à 30.2(N/mm²).



(a)



(b)

Figure 0-4. Résultats d'essai par compression

Nous constatons que la présence de pouzzolane dans la composition de ciment avec des grands pourcentages peut introduire un effet direct et plus important sur la résistance après une durée de 28 jours.

IV.10 Conclusion générale

L'étude entreprise dans ce travail indique qu'il est possible d'exploiter les gisements de ressources naturelles telles que la pouzzolane naturelle de Béni-Saf, les gisements de calcaire de Meftah ainsi que les résidus industriels disponibles en Algérie pour produire des ciments binaires et ternaires.

Les résultats menés à travers cette étude dans les deux cas permettent de dégager que la substitution d'un ciment Portland composé par un taux 10% de pouzzolane et [35% et 45%] de calcaire améliore les résistances mécaniques des mortiers au jeune âge dans les 2 jours et 7 jours. Par contre ces dernières sont améliorées par des taux de 40% de pouzzolane et 5% de calcaire à long terme (28 jours).

Les résultats de notre étude montrent l'intérêt d'utiliser la pouzzolane en substitution partielle au ciment sur les performances mécaniques des mortiers. Le ciment à base de la pouzzolane naturelle, accroît la résistance mécanique par sa réactivité avec la chaux libre par hydratation du ciment.

Les mortiers préparés à partir de ciment à base de pouzzolane et de calcaire, malgré des faibles performances à jeune âge, ont tendance à se rattraper dans le temps et à rejoindre les propriétés du ciment portland.

Références bibliographiques

- [1]. Douglas E, « Mortier de ciment au laitier et béton de laitier : caractéristique de durabilité », Matériaux complémentaires en cimentation, CANMET, V. M. Malhotra Ed, Chapitre. 6, PP. 6, 1989
- [2]. Ingram, K., Poslusny, M, Daugherty, Rowe, W. (1990): Carboaluminate reactions Influenced by limestone additions, tiré de Carbonate additions to cement, Klieger P. ET Hooton D. éditeurs, STP 1064.
- [3]. F. Gabrysiak – Matériaux – Les bétons – Chapitre 4.
- [4]. Ramachandran, V S, Zhang Chun-mei 1986: Hydration kinetics and Micro structural Development in the $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}\text{-CaCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ system, Matériaux et Constructions, vol.19, n°114, p.437-444
- [5]. Soroka I, Setter, N, 1977: The effects of filler on strength of cement mortars, - Cement and Concrete Research, vol.26, n°4, p.449-456.
- [6]. Gagné et Aïtcin, 1993, « Super plasticizers for durable concrète, Comptes rendus de la conférence internationale sur la durabilité du béton », Monterrey, Octobre, Mexique, P. 200-217.
- [7]. Documents de référence : (PAF)
NA 442/2000 – NA 235.
FDS.
- [8]. <http://archives.univ-biskra.dz/bitstream/123456789/24403/1/REFRAFI%2C%20Salah.pdf>
- [9]. https://www.researchgate.net/figure/Procede-de-fabrication-du-ciment-portland-par-voie-s-eche-29_fig5_336319573

[10]. <https://www.memoireonline.com/11/12/6476/Etude-de-l-influence-de-l-ajout-de-la-pouzzolane-sur-les-caracteristiques-physico-chimiques-des-ci.html>

[11]. T.Z. Harmathy et L. W. Allen, (juin 2003). "Mécaniques des mortiers". Thèse de Magister Université Mostaganem.

[12]. I. Ben messaoud, (2013). "Synthèse et caractérisation des matériaux géopolymère à base d'une argile Tunisiene thèse de doctorat dans la dicipline matériaux et environnement". Université de sfax, école nationale d'ingénieur de sfax.

[13]. POLYCOPIES LIANTS 2023.docx de Mr. Bouras

[14] Ahmed Gmira, Etude structurale et thermodynamique d'hydrates modèle du ciment. Matériaux, 2003, Université d'Orléans.

15. M. Venuat – La pratique des ciments, mortiers et bétons – Tome 1 : « Caractéristiques des liants et des bétons, mise en œuvre des coulis et mortiers » - édition2 – Collection Moniteur. – 277p-1989.

16. <https://www.lesindustriesduplatre.org/tout-savoir-sur-le-gypse/>

[17] **Mr** : BOUGLADA Mohamed Salah <Effet de l'activation du ciment avec ajout minéral par la chaux fine sur le comportement mécanique du mortier>, Mémoire de magister université Mohamed Boudiaf de msila

[18] A. MEBROUKI, (juin 2003). "Influence de la pouzzolane de Beni-Saf sur les caractéristiques mécaniques des mortiers". Thèse de Magister, Université de Mostaganem.

[19] Bouglada Mohamed Salah, «Effet de l'activation du ciment avec ajout minéral par la chaux fine sur le comportement mécanique du mortier», Mémoire Magister, Université de M'sila, Année 2007/2008

[20] Cimbéton. Guide de prescription du ciment pour des constructions durables. Paris. Octobre 2009.

- [21] Kerbouche. A, M. Mouli, L. Laoufi, Y. Senhadji, S. Benosmane. 2009. Influence des ajouts minéraux sur les résistances mécaniques des mortiers. Faculté des sciences, Laboratoire de Chimie des Polymères, Université d'Oran, Es-sénia, Oran. P 432-437.
- [22] AJOUT CIMENTAIRE .COURS Mr Bouras
- [23] Philippe rocher, la pouzzolane, géologue, BRGM auvergne
- [24] Ciments Français, La fabrication des ciments. Eyrolles, 1993.
- [25] Badr Eddine Kchakech « Étude De l 'influence de l'échauffement subi par un béton sur le risque d'expansions associées à la Réaction Sulfatique Interne » Thèse de doctorat, Université Paris-Est doctorat, 2016.
- [26] Guide pratique de béton « Concevoir et mettre en œuvre des bétons durables » Editeur : Holcim (Suisse) SA 6ème édition 2015.
- [27] Sylvain Stephan « étude de l'influence de l'hydratation des laitiers sur les propriétés de transfert gazeux dans les matériaux cimentaires », Thèse de doctorat, Université de Bourgogn, 2018.
- [28] Benoît Hilloulin : « Méthodes avancées et analyses multi-échelles pour l'étude de l'auto cicatrisation des fissures dans les matériaux cimentaires » thèse de doctorat, Université de Nantes Angers le mans, 2015
- [29] Amari Mohand « Activation chimique de la pouzzolane » mémoire de master, Université A. Mira Bejaïa, 2017-2018.