



**Ministère de l'enseignement supérieure
et de la recherche scientifique**

**Université Mohamed Boudiaf - M'sila
Faculté de technologie**

Département de GENIE CIVIL



MEMOIRE

**Présenté pour l'obtention du diplôme de
MASTER**

FILIERE : Génie Civil

SPECIALITE : Matériaux

THEME

Caractérisation d'un ciment à base de pouzzolane

Dirigé par :
Pr RAHMOUNI Zine El Abidine
Melle TEBBAL Nadia

Présenté par :
AOUIDIDI Lwiza

Promotion : 2015/2016.

Remerciement

La présente étude a été réalisée au laboratoire de contrôle qualité de la cimenterie Lafarge M'sila Algérie.

Tout d'abord, nous remercions DIEU le tout puissant de nous avoir donné le courage et la patience de bien mener ce travail, qu'il soit béni et glorifié

J'à exprimer toute notre gratitude, toute notre reconnaissance et tout notre remerciement a :

Mes encadreurs Dr RAHMOUNI ZINE EL ABIDINE et Melle TEBBAL NADIA pour leur patience, leur disponibilité, pour leur écoute, leur conseils, ainsi que pour leur rigueur scientifique, qu'ils ont su me communiquer pour mener au mieux ce travail de recherche.

En deuxième lieu, je remercie les membres de jury, de m'avoir fait l'honneur d'accepter de juger ce travail. Certes, leurs remarques et leurs conseils seront aussi utiles que nombreux, pour mes futurs travaux.

Je suis très reconnaissante à Mr M. BOUBAKRI ingénieur du laboratoire de contrôle qualité Lafarge M'sila d'avoir mis à ma disposition les moyens matériels ainsi que de son temps de m'avoir aidé de prêt.

J'associe à ces remerciements B.DAHMANI et tous les membres du laboratoire de contrôle qualité Lafarge, les ingénieurs et les techniciens avec qui j'ai eu le plaisir de travailler.

Pour leur support technique et moral, je remercie et je salue chaleureusement les personnels de Lafarge de M'sila qui ont m'ont fournie la matière de pouzzolane pour mon étude expérimentale;

MERCI.

Je remercie vivement tous les enseignants qui ont contribué à notre formation.

Dédicace :

Cher à mon père Allah yarhmou , qui je voulais être présent dans le jour le plus important de ma vie.

A toi maman, à tout membre de ma famille

A vous mes adorables sœurs.

DALLAL et ses enfants YOUNES et LOAY

SIHAM et ses enfants MAZIGH, SID ALI et ALICIA

NADIA

À vous tous qui vous m'avez aidé et encourager par vos conseil et vous m'avez offert tout pour la réussite.

A ma meilleur amie : pour m'avoir supporté durant ces cinq années d'études
SAMAI SOUMIA.

A mes amis par leur nom : T-HAJIRA, H-AHLEM, BOUTHAYNA et à tous mes amis que je n'ai pas cite je leurs fait toutes mes excuses.

A mon meilleur ami OUSSAMA je te souhaite beaucoup de réussite dans ton vie.

Résumé

Les ajouts cimentaires font actuellement partie des développements les plus récents dans la production du ciment, car leurs utilisations apportent une amélioration des propriétés mécaniques des matériaux cimentaires.

D'autre part leurs utilisations ont pour objectifs de réduire la consommation de clinker, en contribuant de manière simple et économique à résoudre les problèmes liés à l'environnement.

Ce travail expérimental étudie les avantages et la possibilité de substitution partielle du clinker par l'ajout pouzzolane dans le ciment.

L'étude consiste à préparer un ciment avec la pouzzolane en remplaçant un certain pourcentage de clinker par quatre pourcentages de l'ajout [0%, 10%, 20%, 30%] du poids de ciment. Afin d'étudier les caractéristiques du ciment à base de pouzzolane et le comportement mécanique du mortier.

Les caractéristiques du ciment à l'état anhydre et l'état hydraté sont (Composition chimique, temps de broyage, poids spécifique, finesse, consistance des pâtes de ciment, chaleur d'hydratation et temps de prise), ainsi que les caractéristiques des mortiers préparés par ces ciments, telles que, le retrait, le gonflement, le comportement mécanique (résistances mécaniques à la compression et à la flexion, le gonflement et le retrait) ont été étudiées.

D'après les résultats expérimentaux obtenus, il ressort que la quantité d'ajout pouzzolane et la composition chimique du ciment confectionné sont les principaux paramètres qui influent sur la variation des résistances mécaniques (flexion et compression) des mortiers testés.

ملخص

ان تدعيم استعمال الاضافات الإسمنتية هي حاليا جزء من التطورات الأخيرة في إنتاج الإسمنت مما أدى إلى تحسن كبير للخصائص الميكانيكية للمواد الإسمنتية.

و علاوة على ذلك إن استعمالها يؤدي إلى انخفاض في استهلاك مادة الكلنكر ويساهم في حل المشاكل البيئية بطريقة بسيطة واقتصادية.

الغرض من هذا العمل التجريبي هو دراسة مزايا وإمكانية طريقة الاستبدال الجزئي للإسمنت بمادة البزولان المضافة في المونة.

تهتم هذه الدراسة التجريبية إلى تحضير اسمنت ذو إضافات معدنية باستبدال نسبة مئوية معينة من مادة الكلنكر بمادة البزولان (0%، 10%، 20%، 30%) لدراسة أثره على الخصائص الفيزيائية والكيميائية للإسمنت المحضر بالمادة المعدنية المضافة وذلك المقاومة الميكانيكية للمونة.

إن الخصائص الفيزيائية والكيميائية للإسمنت المحضر بالمادة المعدنية المضافة في الحالة الجافة والمبللة (التركيب الكيميائي ، الوزن النوعي ، النعومة ، التوزيع الحبيبي القوام القياسي للعجينة الإسمنتية ، و زمن الشك) و كذلك مميزات المونة في الحالة الصلدة ، التقلص الانتفاخ، والمقاومة الميكانيكية (مقاومة الضغط و الانحناء)، تم تحديدهم خلال هذا العمل التجريبي. ووفقا لنتائج التجارب التي حصل عليها يتبين لنا أن أهمية مادة البزولان المضاف و التركيب الكيميائي للإسمنت المصنع هي العوامل الرئيسية التي تؤثر على تغيير المقاومة الميكانيكية(مقاومة الضغط و الإنحناء) للمونة المختبرة.

Abstract

The supplementary cementitious materials are currently part of the latest developments in the production of cement, resulting in a significant improvement to the mechanical performances of cementitious materials.

For ther more, to the existed that it leads to a reduction in cement consumption, the use of additions contributes to solving environmental problems in a simple and economic manner.

This experimental work presents a study of the advantages and the possibility of the partial replacement of cement by limestone admixture in mortar. This experimental study consists to make the cement with mineral admixture while replacing a certain percentage of clinker by pouzzolane :(0%, 10%, 20%, 30%), to study its effect on the physico-chemical properties of cement manufactured with mineral addition and mortar mechanical behavior.

The physico-chemical properties of cement at anhydrous state and the hydrated state (chemical composition, specific weight, fineness, particle size distribution, consistency of the cement paste, setting times, shrinkage and expansion), thus the characteristics of the mortars made at their bases, such as, the mechanical behavior (flexural and compressive strengths) for the mortar were studied.

According to the experimental results obtained, it comes that the quantity of mineral additive (pouzzolane) and the chemical composition of cement manufactured are the principal parameters who influence on the variation of the mechanical strengths (flexural and compressive) of the mortars tested.

Nomenclature :

Acronyme des termes utilisés :

CEM : Ciment Portland.
CSH : Aluminates de calcium hydratés.
CPA : Ciment portland (dans la notation française).
CPJ : Ciment portland composé.
CHF : Ciment de haut fourneau.
CPZ : Ciment pouzzolanique.
CLC : Ciment au laitier et aux cendres.
C3S: Le silicate tricalcique.
C2S : Le silicate bicalcique.
C3A: L'aluminate tricalcique.
C4AF : L'alumino-ferrite tétracalcique.
CaO: Chaux.
CaSO₄: Gypse.
SiO₂: Silice.
Fe₂O₃ :L'oxyde de fer.

Lettres grecques :

ρ : la densité du ciment.
 e : la porosité.
 $\Delta l(t)$: La variation relative de longueur au temps.
 \emptyset : Taille des boulets de broyeur.

Lettres latines :

T : Température de la salle d'expérience °C.
R_c : Résistance à la compression.
R_f : Résistance à la flexion.
E : l'expansion.

Sommaire :

Chapitre I : Synthèse Bibliographique

Introduction	03
I-1Ciment	
I-1.1 Historique	04
I-1-2. Définition du ciment	04
I-1-2.1- Principales phases du ciment portland	04
I-1-2.2- Les différentes méthodes de fabrication de ciment	05
I-1-2.3- Principe de fabrication du ciment Portland	05
I-1-2.3.1 -Matières premières.....	06
I-1-2.3.2- Les étape de la fabrication du ciment Portland.....	06
• Extraction et préparation des matières premières.....	07
• Le concassage	07
• Le broyage et le séchage	07
• Le préchauffage.....	08
• La cuisson.....	08
Les phénomènes physico-chimiques à la cour de la cuisson	08
• Refroidissement du clinker	09
• Broyage de clinker.....	09
• Le stockage et les expéditions	11
• La salle de contrôle et le contrôle qualité	11
I-1-2.3.3 Les Constituants principaux de ciment	11
• Le clinker	11
• Constituants du clinker	11
• Les différent types des ajouts	12
• Le gypse (CaSO ₄)	12
• Ajout minéral actif	13
** Les laitiers de haut-fourneau	13
** Les cendres volantes	13
** Les fumées de silice	13
** Les Pouzzolanes	14
I-1-2.4 Les principales catégories de ciment	14
I-1-2.4.1 Classification des ciments en fonction de leur composition	14
I-1-2.4.2 Classification des ciments en fonction de leur résistance normale	15
I-1-2.5 Hydratation du ciment Portland	16
I-1-2.5.1 Évolution chimique	16
I-1-2-5.2 Principaux produits de l'hydratation	16
* Hydratation des silicates de calcium C ₃ S et C ₂ S	16
- Dissolution du silicate tricalcique (C ₃ S)	16
- Croissance rapide du gel de C-S-H	16
- Précipitation de la Portlandite.....	17
*Hydratation des aluminates	17
• La phase initiale	17

✓ Dissolution du C3A et du gypse	17
✓ Précipitation de l'ettringite	17
✓ La période dormante	18
✓ l'épuisement du gypse	18
✓ Réactions à long terme	18
I-1-3- Les caractéristiques du ciment portland.....	18
I-1-3-1 La prise	18
I-1-3-2 Le durcissement.....	19
I-1-3-3 La Finesse de Mouture (finesse de Blaine).....	19
I-1-3-4 Le Retrait.....	20
I-1-3-5 Chaleur d'hydratation	21
I-1-3-6 Résistance à la compression.....	22
I-2- la pouzzolane.....	23
I-2-1. Historique	23
I-2-2. Localisation du gisement de Béni-Saf	23
I-2-3. Définition	24
I-2-3.1 Nature du matériau pouzzolanique de Béni-Saf	24
I-2-3.2 La couleur des pouzzolanes	24
I-2-3.3 Qualités des roches utiles du gisement Bou-Hamidi.....	25
I-2-3.4 Réaction pouzzolanique	25
I-2-3.4.1 Chaleur d'hydratation.....	26
I-2-3.5 Types de pouzzolane	27
I-2-3.5.1 Pouzzolane naturelle	27
I-2-3.5.2 Pouzzolane artificielle	27
I-2-3.6 Effet de La pouzzolane	27
I-2-3.6.1 A l'état frais	27
I-2-3.6.2 A l'état durci	28
I-2-3.7 Propriété de la pouzzolane	28
I-2-3.7.1 Propriétés hydrauliques	28
I-2-3.7.2 Propriétés physiques de remplissage	28
I-2-3.8 L'utilisation de la pouzzolane	28
Conclusion.....	29
Chapitre II : matériaux et méthodologie d'essais.....	30
Introduction	31
II-1-Matières Premières	32
II-1-1-La pouzzolane	32
• Analyses Chimiques de Pouzzolane Bani-saf	32
• Caractéristique physique	32
II-1-2 Le clinker	32
II-1-3 Le gypse	33
II-1-3-1 Composition chimique	33
II-2 Formulation des Ciments.....	33
II-2-1 Composition pondérale des différents ciments	33
II-2-2 Analyses chimiques des différents ciments préparés	34

II-2-3 Analyses minéralogiques DRX des ciments préparés	34
II-3 Formulation des mortiers normalisés	34
II-3-1 L'eau de gâchage	35
II-3-2 -le sable	36
II-4 Mesures expérimentales	36
II-4-1 Essai sur ciment anhydre	36
II-1-1-1 -Détermination de La densité	36
II-1-1-2 -Détermination de La finesse de mouture (finesse de Blaine)	36
II-1-1-3 -Détermination du refus pour les matières fines:.....	37
II-4-2 Essai sur ciment hydraté	38
II-4-2-1 -Détermination de la consistance normale	38
II-4-2-2 -Détermination du temps de prise	39
II-4-2-3 -Détermination de l'expansion	40
II-4-2-4 -Détermination de la chaleur d'hydratation	41
II-4-3 - Essai sur mortier	43
II-4-3-1 Détermination de la résistance mécanique par compression et par flexion	43
II-4-3-2 mesure du retrait et de gonflement	46
Conclusion	48
Chapitre III : Résultats et interprétation	49
Introduction	50
III-1 Essais sur ciment anhydre	51
III-1-1 - Influence du taux de pouzzolane sur le poids spécifique du ciment	51
III-1-2 - Influence du taux d'ajout pouzzolane sur la surface spécifique du ciment	52
III-1-3 - Influence du taux d'ajout pouzzolane sur le refus	53
III-2 -Essais sur ciment hydraté	54
III-1-1 - Influence du taux de pouzzolane sur la consistance normale	54
III-1-2 - Influence du Taux de pouzzolane sur le Temps de Prise	55
III-1-3 - Influence du Taux d'ajout pouzzolane Sur la Stabilité du Ciment	57
III-1-4 - Influence du Taux de pouzzolane sur la chaleur d'hydratation	58
III-3 Essais sur mortiers	59
III-3-1 Influence du Taux de pouzzolane sur la résistance à la compression	59
III-3-2 Influence du Taux de pouzzolane sur la résistance à la Flexion	61
III-3-3 Influence du Taux de pouzzolane sur le Retrait	62
III-3-4 Influence du Taux de pouzzolane sur le Gonflement	63
III-4 -La Relation entre la surface spécifique et les analyses granulométriques	64
III-5 -Effet du Chaleur d'hydratation Sur le Temps de Prise	65
Conclusion	67

Liste des tableaux :

Chapitre I : Synthèse Bibliographique

Tableau.I-1 : Composition chimique en oxydes d'un ciment ordinaire et notation cimenterie.....	04
Tableau.I-2 : Les principes phase de ciment.....	05
Tableau.I-3 : Composition chimique du clinker	11
Tableau.I-4 : Désignation des différents types de ciment en fonction de leur composition.....	15
Tableau.I-5 : Les classes de ciment selon la résistance à la compression.....	15
Tableau.I-6 : Qualité et activité de la roche du gisement Bouhamidi.....	25
Chapitre II : matériaux et méthodologie d'essais	
Tableau.II-1 : Composition chimique élémentaire de la pouzzolane	32
Tableau.II-2 : Caractéristique physique de pouzzolane	32
Tableau.II-3 : Principaux constituants du cru de clinker	33
Tableau.II-4 : Composition chimique du gypse	33
Tableau.II-5 : Composition pondérale des différents ciments	34
Tableau.II-6 : Composition chimique des ciments préparés	34
Tableau.II-7 : Analyses minéralogiques DRX des différents ciments	35
Tableau.II-8 : Composition des mortiers	45
Chapitre III : Résultats et interprétation	
Tableau.III-1 : La masse volumique	51
Tableau.III-2 : La finesse de Blaine.....	52
Tableau.III-3 : Refus	53
Tableau.III-4 : La consistance.....	54
Tableau.III-5 : Temps de prise.....	55
Tableau.III-6 : Expansion.....	57
Tableau.III-7 : Chaleur d'hydratation.....	58

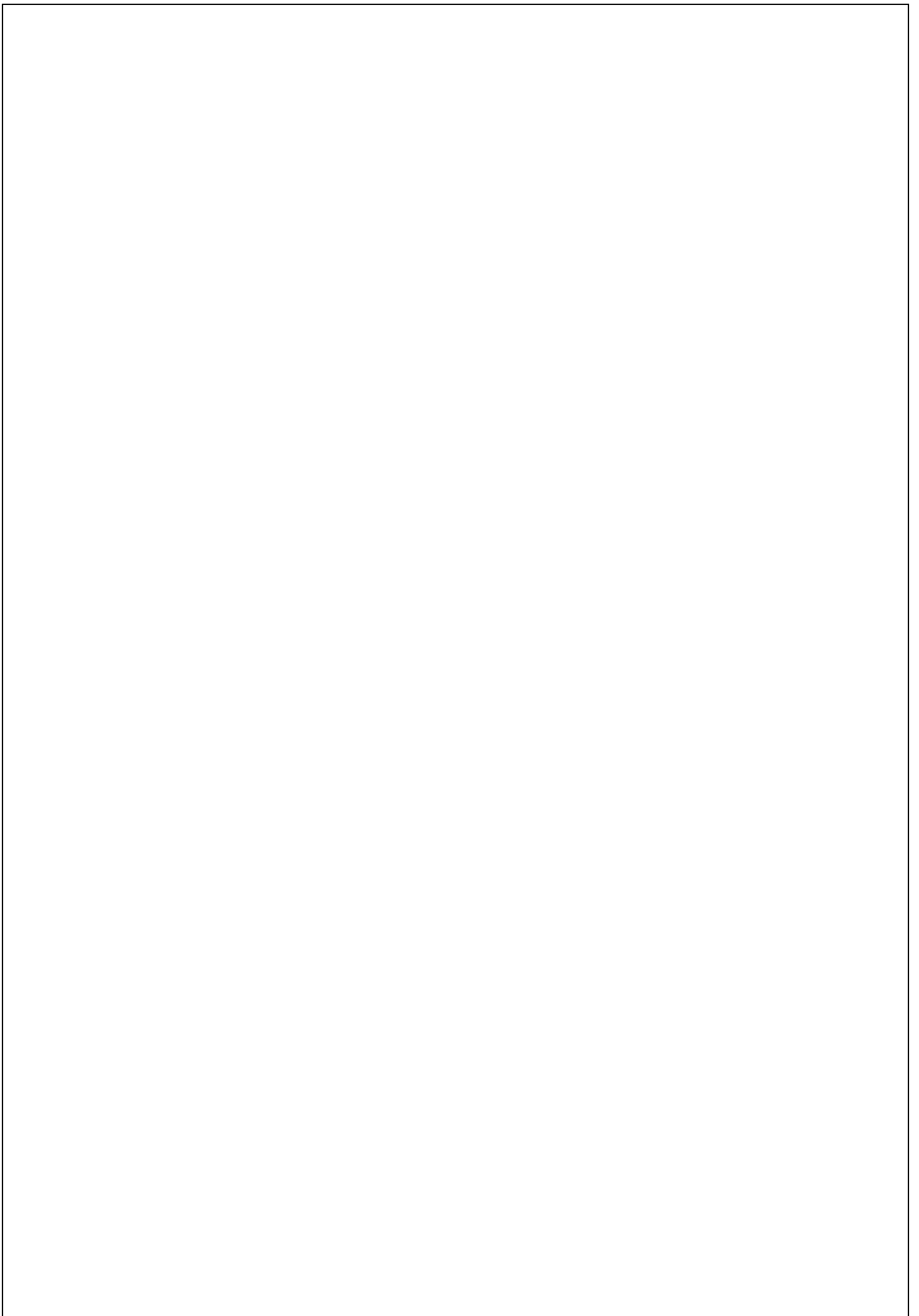
Tableau.III-8 : Résistance à la compression.....	59
Tableau.III-9 : Résistance à la flexion.....	61
Tableau.III-10 : Retrait.....	62
Tableau.III-11 : Gonflement.....	63
Tableau.III-12 : Refus en fonction de la surface spécifique.....	64
Tableau.III-13 : Début de prise Vs chaleur d'hydratation	65

Liste des figures :

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Fig.I-1 Le processus de fabrication du ciment Portland.....	05
Fig.I-2 Etape de l'extraction des matières premières aux niveaux de la carrière.....	07
Fig.I-3 Etape de concassage.....	07
Fig.I-4 Schéma d'un four rotatif dans les cimenteries.....	09
Fig.I-5 : Nodules de clinker.....	09
Fig.I-6 Modes de broyage d'un grain de poudre dans un broyeur à boulet	09
Fig.I-7 Broyeur à boulets.....	10
Fig.I-8 Ecoulements possibles dans un broyeur à boulets.....	10
Fig.I-9 : Image d'une section polie d'un clinker réalisée au Microscope Electronique à Balayage en électrons rétrodiffusés.....	12
Fig.I-10 :Image de la précipitation des C-S-H et des cristaux de pentlandite (lamelles hexagonales) obtenue en microscopie à balayage $G = \times 1010$	17
Fig.I-11 : Image des cristaux d'ettringite obtenue en microscopie à balayage	18
Fig.I-12 : Détermination du temps de début de prise.....	19
Fig.I-13 : Influence de la surface spécifique sur la résistance à la compression.....	20
Fig.I-14 : Influence de l'E/C sur le retrait plastique des mortiers.....	21
Fig.I-15 : Chaleur dégagée lors de l'hydratation du CPA.....	21
Fig.I-16 : Résistance du mortier normal.....	22
Fig.I-18 :Localisation du gisement de Bouhamidi (Béni-Saf).....	24

Fig.I-19: Gel de C-S-H.....	25
Fig.I-20: les réactions d'hydratation ciment et de la pouzzolane.....	26
Fig.I-21: Effet des ajouts (la pouzzolane naturelle d'Italie) sur la chaleur d'hydratation du ciment portland.....	27
Chapitre II : Matériaux et formulation et méthodologie d'essais	
Fig.II-1: Scories de la pouzzolane naturelle de Beni-Saf avant broyage.....	32
Fig.II-2: Sachet de Sable Normalisé.....	35
Fig.II-3: Flasque Le Chatelier.....	36
Fig.II-4: Le Densimètre de Le Chatelier.....	37
Fig.II-5: Tamiseuse Alpine (Laboratoire de Lafarge M'sila) Alpine en service.....	38
Fig.II-6: Malaxeur et l'appareil de vicat.....	39
Fig.II-7: Appareil de Vicat Automatique pour la détermination des temps de prise.....	40
Fig.II-8: aiguille de la chatelier.....	41
Fig.II-9: appareil de chaleur d'hydratation.....	42
Fig.II-10: Malaxeur semi-automatique de mortier	44
Fig.II-11: Eprouvette Prismatique (4x4x16) cm ³	44
Fig.II-12: Table à Choc	44
Fig.II-13: Machine de Compression et de flexion.....	45
Fig.II-14 Bain d'eau pour la conservation des éprouvettes.....	46
Fig.II-15 appareil de retrait.....	47
Chapitre III : Résultats et interprétation	
Fig.III-1: Variation du poids spécifique de ciment en fonction de taux de pouzzolane.....	51
Fig.III-2: Variation de la surface spécifique de ciment en fonction de taux d'ajout pouzzolane.....	52
Fig.III-3: Analyse granulométriques de ciment préparé (ALPINE).....	54
Fig.III-4: Variation du Rapport E/C (Consistance normale) en fonction du taux de pouzzolane.....	55
Fig.III-5: Variation des Temps de prises en fonction de taux de pouzzolane.....	56
Fig.III-6: Variation de l'expansion en fonction de taux de pouzzolane.....	57
Fig.III-7: Variation de la chaleur d'hydratation en fonction de taux de pouzzolane.....	58
Fig.III-8: Variation de la résistance mécanique à la compression en fonction de taux de pouzzolane.....	60
Fig.III-9: Variation de flexion en fonction de taux de pouzzolane.....	61
Fig.III-10: Variation de retrait en fonction de taux de pouzzolane.....	62
Fig.III-11: Variation de gonflement en fonction de taux de pouzzolane.....	64



Introduction générale:

Introduction générale :

Les matériaux de construction et en particulier les matériaux silicates jouent un rôle très important dans le développement de l'économie pour tous les pays, parmi ses matériaux de construction le ciment. Ce matériau occupe la première place dans le monde par son utilisation et sa production.

C'est un produit nécessaire au développement économique, pour cette raison, des milliers de cimenteries ont été construites dans le monde.

Face à l'accroissement de la demande en ciment surtout dans certaines régions, il est devenu impératif de s'orienter vers l'utilisation de différents matériaux comme les laitiers de haut fourneau, les cendres volantes et les pouzzolanes, en remplacement du ciment. Cette exploitation est très importante, car leurs utilisations apportent une amélioration des propriétés mécaniques des matériaux cimentaires (mortier). D'autre part leur utilisation aura pour objectif de réduire la consommation de clinker, en contribuant de manière simple et économique à résoudre les problèmes liés à l'environnement (la diminution du gaz CO₂).

Objectifs de l'étude :

L'objectif de notre étude est d'évaluer expérimentalement l'influence du taux d'ajout de pouzzolane (0%, 10%, 20%, 30%) sur les caractéristiques physico-chimiques des ciments préparés et mécaniques de mortier à leurs bases.

Nous présentons dans la première partie de ce travail, une synthèse bibliographique des connaissances sur la fabrication du ciment Portland, sur les principales familles des ajouts minéraux et leurs utilisations ainsi que leurs effets bénéfiques sur l'amélioration des propriétés essentielles des mortiers (nous examinons et analysons les modifications des différentes propriétés par la présence de la pouzzolane de Beni-Saf).

Dans le deuxième chapitre, on présente les caractéristiques (propriété physique et chimique) des matériaux étudiés et des techniques expérimentales utilisées dans la confection des différents types de mortier : un mortier à base de ciment (CPA CEM I/A 42.5), des mortiers à base de ciment et pouzzolane avec une variation des pourcentages.

Dans la troisième partie, nous présentons les résultats des essais physiques et mécaniques (consistance normal, résistance par flexion et compression...).

En fin, une conclusion générale proposée les points sur les résultats obtenus à l'aide des résultats issus des expériences au laboratoire.

Chapitre I :

Synthèse bibliographique

Introduction :

Les liants inorganiques ont eu un rôle important dans l'industrie de la construction depuis de nombreux siècles, sont classifiées aujourd'hui comme ciment, chaux et plâtres. Ces liants, utilisés parfois en tant que tels, sont souvent mélangés pour l'obtention d'un produit répondant aux caractéristiques techniques requises par l'utilisateur.

Au deuxième siècle, les Romains ajoutaient de la chaux à la pouzzolane pour améliorer ses propriétés hydrauliques, puis le mélangeaient avec des granulats pour obtenir le "bitume".

De nos jours, les différents types de liants sont bien connus, en particulier les ciments, et ils deviennent des produits de plus en plus sophistiqués, adaptés aux nécessités techniques particulières.

En Europe pendant plusieurs décennies, les normes nationales ont gouverné la production qualitative de ces liants en respectant, dans chaque pays producteur, la diversification. Les Normes Européennes EN ont rassemblé le savoir-faire des différents pays pour établir une Norme Unique Européenne [1].

I-1-Ciment :**I-1-1-Historique :**

Les Romains furent probablement les premiers à fabriquer des liants hydrauliques. En effet, ils mélangeaient de la chaux et des cendres volcaniques de la région de Pozzuoli au pied du Vésuve donnant naissance au ciment « Pouzzolanique » ; matériau capable de fixer la chaux en présence d'eau. Cependant, ce n'est qu'au XVIII^{ème} siècle que fut inventé le ciment artificiel.

En 1817, les travaux du Français Louis Vicat ont permis de déterminer les proportions de calcaire et de silice nécessaire pour constituer le mélange qui après cuisson à la température adéquate et broyage, donnera un véritable liant hydraulique fabriqué industriellement. Quelques années plus tard, en 1824, l'Écossais Aspdin dépose un brevet pour la fabrication d'une chaux hydraulique à prise rapide qu'il appelle commercialement le ciment « Portland » (car la couleur de son produit ressemble aux célèbres pierres de la péninsule de Portland située dans la Manche).

I-1-2-Définition du ciment :

Le ciment est un produit moulu du refroidissement du clinker qui contient un mélange de silicates et d'aluminates de calcium porté à 1450 – 1550 °C, température de fusion.

Elle est défini selon la norme NFP15301, comme une fine mouture inorganique qui gâchée avec l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit. Le ciment portland est constitué d'un mélange de clinker, de gypse [2] et d'ajouts minéraux, le ciment est majoritairement composé de quatre phases anhydres.

Oxydes	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaSO ₄	H ₂ O	SO ₃
composition	50-70%	5-10%	15-30%	5-10%	0-5%	0-2%	0-5%
Notation cimenterie	C	A	S	F	CS	H	S

Tableau I-1 : Composition chimique en oxydes d'un ciment ordinaire et notation cimenterie [3].

Le ciment usuel est aussi appelé liant hydraulique, car il a la propriété de s'hydrater et de durcir en présence d'eau car cette hydratation transforme la pâte liante, qui a une consistance de départ plus ou moins fluide, en un solide pratiquement insoluble dans l'eau. Ce durcissement est dû à l'hydratation de certains composés minéraux, notamment des silicates et des aluminates de calcium [4]. L'expression de « pâte de ciment durcissant » sera utilisée pour désigner la pâte de ciment dans la transformation d'un état plus ou moins fluide en un état solide [5].

Le ciment ordinaire anhydre est constitué de clinker Portland, de gypse et éventuellement d'additions telles que les cendres volantes, le laitier granulé de haut fourneau, la fumée de silice, pouzzolanes naturelles..., etc. [6]

I-1-2-1 Principales phases du ciment portland

Les principales phases du ciment portland sont comme suivant [9] :

Composé	Composition	Abréviation
Silicate tricalcique	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C3S
Silicate bicalcique	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C2S
Aluminate tricalcique	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	C3A
Aluminoferrite tétracalcique	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	C4AF

Tableau.I-2 : Les principales phases du ciment Portland [3]

I-1-2-2 Les différentes méthodes de fabrication de ciment

IL existe quatre méthodes de fabrication du ciment [4] :

- Fabrication du ciment par voie humide (la plus ancienne).
- Fabrication du ciment par voie semi-humide (en partant de la voie humide).
- Fabrication du ciment par voie sèche (la plus utilisée).
- Fabrication du ciment par
- voie semi-sèche (en partant de la voie sèche).

I-1-2-3 Principe de fabrication du ciment Portland

Le ciment est produit à partir des roches facilement accessibles : calcaire, marbre et argile. De façon générale, un mélange renferme environ 80% de calcaire et 20% d'argile.

Le mélange finement broyé est porté à 1450°C dans un four rotatif pour produire le clinker. Le ciment résulte d'un broyage très fin du clinker. Lors de la phase de broyage, du gypse (5% en poids) est ajouté pour mieux maîtriser le temps de prise. A ce niveau, éventuellement d'autres constituants minéraux associés, parmi ces substances figurent la pouzzolane naturelle, les cendres volantes, les laitiers de hauts fourneaux, le calcaire....etc.

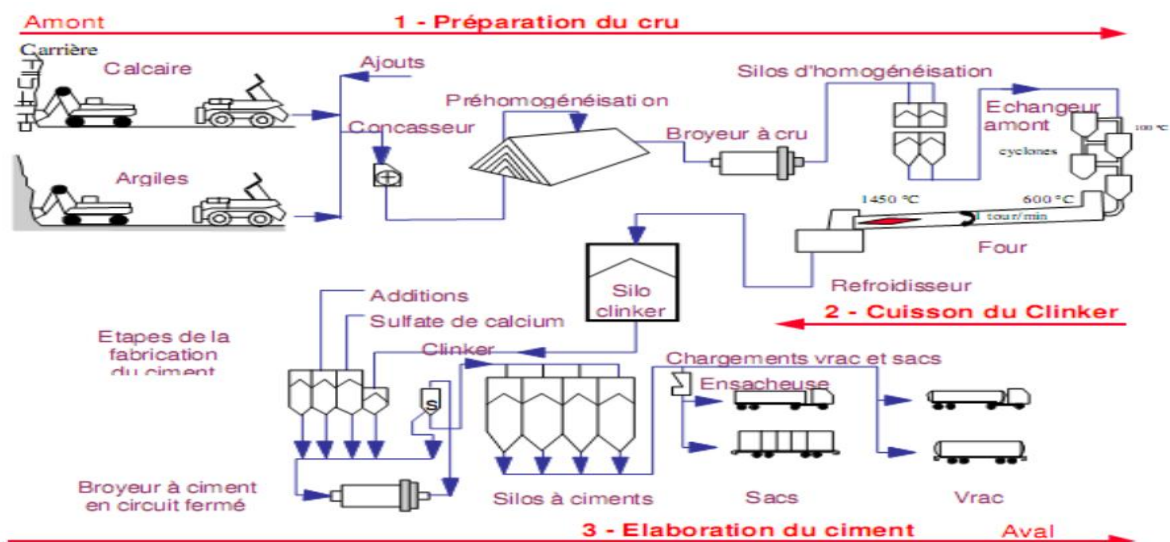


Figure. I-1 : Le processus de fabrication du ciment Portland.

Le composé de base des ciments actuels est un mélange de silicates et d'aluminates de calcium résultant de la combinaison de la chaux (CaO) avec la silice (SiO_2), l'alumine (Al_2O_3), et l'oxyde de fer (Fe_2O_3). La chaux nécessaire est apportée par des roches calcaires, l'alumine, la

silice et l'oxyde de fer par des argiles. Les matériaux se trouvent dans la nature sous forme de calcaire, argile ou marne et contiennent en plus des oxydes déjà mentionnés, d'autres oxydes et en particulier l'oxyde ferrique Fe_2O_3 .

Le principe de fabrication du ciment est le suivant : calcaires et argiles sont extraits des carrières, puis concassés, homogénéisés, portés à haute température (1450 °C) dans un four. Le produit obtenu après refroidissement rapide (la trempe) est le clinker.

Un mélange d'argile et de calcaire est chauffé. Au début, on provoque le départ de l'eau de mouillage, puis au-delà de 100 °C, le départ d'eau d'avantage liée. A partir de 400°C commence la composition en gaz carbonique (CO_2) et en chaux (CaO) et du calcaire qui est le carbonate de calcium ($CaCO_3$).

Le mélange est porté à 1450-1550 °C, température de fusion. Le liquide ainsi obtenu permet l'obtention des différentes réactions. On suppose que les composants du ciment sont formés de la façon suivante : une partie de CaO est retenue par l' Al_2O_3 et le Fe_2O_3 en formant une masse liquide. Le SiO_2 et le CaO restant réagissent pour donner le silicate bicalcique dont une partie se transforme en silicate tricalcique dans la mesure où il reste encore du CaO non combiné [4].

Le clinker se retrouve sous forme de billes ayant un diamètre de 3 à 25 mm. Par la suite, le clinker est refroidi et broyé, puis on ajoute une faible quantité de gypse (environ 3 % de la masse de ciment) pour contrôler la prise du ciment. Le produit ainsi obtenu constitue le ciment Portland [7] [8].

I-1-2-3-1 Matières premières

Les matières premières utilisées pour préparer le mélange à travers lequel la cuisson se transforme en clinker sont:

-Les matières premières de caractère carbonatent (calcaire et certains types de marnes avec une forte teneur en $CaCO_3$).

-Les matières premières d'un caractère acide (argiles, schistes, marnes argileuses, tuf, pouzzolane et autres). Matières premières correctives, dont le rôle est fondamental pour améliorer la composition chimique du mélange sont les suivants:

-Les matières premières d'un caractère silicate (sable de quartz, tuf et autres matières minérales d'origine naturelle ou synthétique).

-Les matières premières avec une teneur élevée en oxydes de fer (pyrite brûlures) et similaires.

Les matières premières qui sont dans le processus d'obtention du produit final mélangé avec du clinker sont le gypse et des additifs tels que la pouzzolane naturelle et synthétique, laitier de haut fourneau, le calcaire et autres [9].

I-1-2-3-2 Les étape de la fabrication du ciment Portland

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 :

- **Extraction et préparation des matières premières**



Figure.I-2 : Etape de l'extraction des matières premières aux niveaux de la carrière.

Les matières premières sont extraites de carrières. Dans la plupart des cas, l'usine est implantée près de la carrière essentielle de calcaire plus au moins marneux, vu l'importance de ce dernier dans la production du ciment.

Pour l'extraction de calcaire dur on utilise des explosifs, et pour le calcaire tendre on utilise des engins comme le bulldozer, scrapeur.....etc. Et pour l'argile on utilise l'excavateur ou pelle mécanique.

- **Le concassage**



Figure.I-3- Etape de concassage.

Les matériaux sont réduits par le concasseur à une taille maximum de 80mm. La roche est ensuite échantillonnée en continu pour déterminer la quantité des différents ajouts nécessaires (oxyde de fer, alumine, silice) et arriver ainsi à la composition chimique idéale.

Le transport de ces matières à l'usine est assuré le plus souvent par des grands camions où à l'aide de convoyeurs à bandes. L'ensemble des matières premières après leurs concassages, sont stockées dans des réserves. Le mélange est ensuite stocké dans un hall de pré homogénéisation où la matière est disposée en couches horizontales superposées puis reprise verticalement.

- **Le broyage et le séchage**

Les matières premières sont ensuite séchées et broyées très finement. On obtient la farine. Celle-ci sera plus tard introduite dans le four sous forme pulvérulente ou préalablement transformée en Granules [1].

- **Le préchauffage**

Avant introduction dans le four, la farine est chauffée à environ 800°C dans un préchauffeur à grille ou à cyclones.

- **La cuisson**

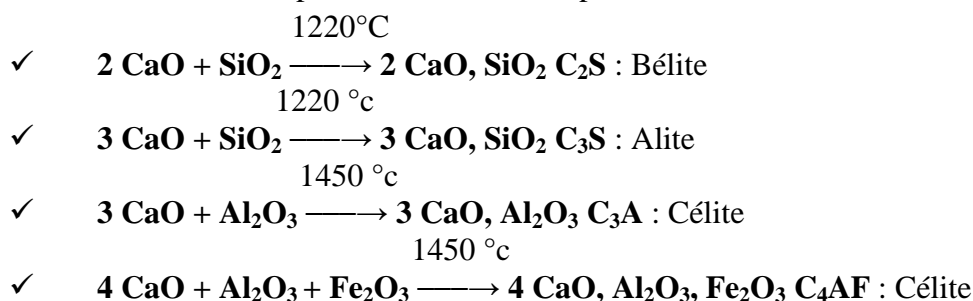
Quel que soit la technique élaborée pour la préparation du cru, les installations de cuisson sont similaires et il existe Cinque zones comme suivant :

- 1-La zone de préchauffage
- 2- La zone de cuisson
- 3- La décarbonatation
- 4- La zone de clinkerisation
- 5- La zone de refroidissement

*** Les phénomènes physico-chimiques au cour de la cuisson**

- A 100°C : évaporation de l'eau libre.
- Entre 450 et 550°C : Evaporation de l'eau de constitution.
- A partir de 650°C : Formation des aluminates et ferrites de calcium.
- A partir de 700°C : Décomposition du calcaire.
- Vers 800°C : Formation du silicate bi calciq (2CaO, SiO₂) 'Bélite'.
- A partir de 1250°C : le silicate tricalcique appelé 'alite' commence à apparaître à partir de la chaux et de la Bélite.
- Entre 1200 et 1260°C : apparition du premier liquide.

Sous l'effet de la chaleur, les constituants de l'argile (silicates d'alumine et d'oxyde de fer) se combinent avec la chaux provenant du calcaire pour donner des silicates et aluminates de chaux.



La cuisson est une opération forte consommatrice d'énergie. La source de chaleur est apportée par une tuyère qui peut brûler différents combustibles : gaz naturel, fuel, charbon, coke de pétrole.



Figure.I-4 : Schéma d'un four rotatif dans les cimenteries.

- **Refroidissement du clinker**

A la fin de la cuisson en aval du four, le clinker obtenu sort à une température comprise entre 1200 et 1450°C et tombe dans le refroidisseur. Ce refroidissement à l'air du clinker fige les phases formées à hautes températures (silicates et aluminates de calcium).

- **Broyage de clinker**

A la sortie du four et après la trempe, les grains de clinker se présentent sous forme de granules allant de quelques millimètres à quelques centimètres de diamètre (Fig 5). A cette finesse, ces granules ne peuvent constituer un liant hydraulique efficace. Le clinker est donc broyé de manière à obtenir des particules de taille plus fines inférieures à 50µm. Cette étape est donc très importante dans la fabrication du ciment car elle permet d'activer les propriétés physico-chimiques du matériau.



Figure. I-5 : Nodules de clinker [11].

Les modes de broyage utilisés en cimenterie sont adaptés au caractère dur, fragile et abrasif du clinker [11, 12].

Le broyage par percussion est réalisé à partir de l'énergie cinétique dans le milieu de broyage. Le choc réalisé entre les grains de clinker et les parois ou les projectiles présents dans le broyeur (boulets) permet de fragmenter les grains. Le broyage par frottement (ou attrition) s'effectue entre les grains de clinker présents dans le broyeur. Les forces appliquées sont généralement tangentes à la surface de la particule.

Ce type de broyage permet d'obtenir de fines particules suite à l'érosion progressive des grains.



Figure. I-6 : Modes de broyage d'un grain de poudre dans un broyeur à boulet [11].

Le broyeur le plus répandu en cimenterie pour le clinker est le tube-broyeur à boulets (**Figure.7**). Il permet d'utiliser une combinaison des différents modes de broyage. Cet appareil est constitué d'un tube en acier divisé en deux parties, la première est chargée avec des granules de clinker (entre 10 et 20 mm) et des boulets en acier de tailles échelonnées ($\varnothing = 80\text{mm}$, $\varnothing = 60\text{mm}$ et $\varnothing = 50\text{mm}$). Les particules les plus fines passent alors au travers d'un diaphragme

séparant les deux compartiments. Dans la seconde, un broyage plus fin est réalisé grâce à des boulets de dimensions plus petites ($\varnothing < 25$ mm).

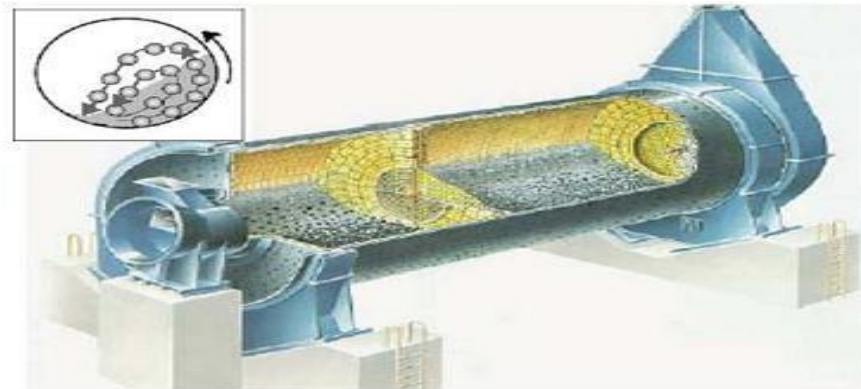


Figure. I-7 : Broyeur à boulets [11].

Le fonctionnement du broyeur à boulet dépend de la vitesse de rotation des cylindres permettant la réalisation de plusieurs états de broyage. A une vitesse faible, la matière présente un état de glissement dans le milieu de broyage, la fragmentation des grains étant réalisée par frottement. Pour une vitesse excessive, la force centrifuge plaque la matière contre les parois du broyeur annulant les effets de broyage. Il existe donc une vitesse critique pour laquelle le régime de cascade est atteint permettant de combiner les modes de broyage par percussion et par frottement dans les zones A et B présentées sur la (Figure. 8)

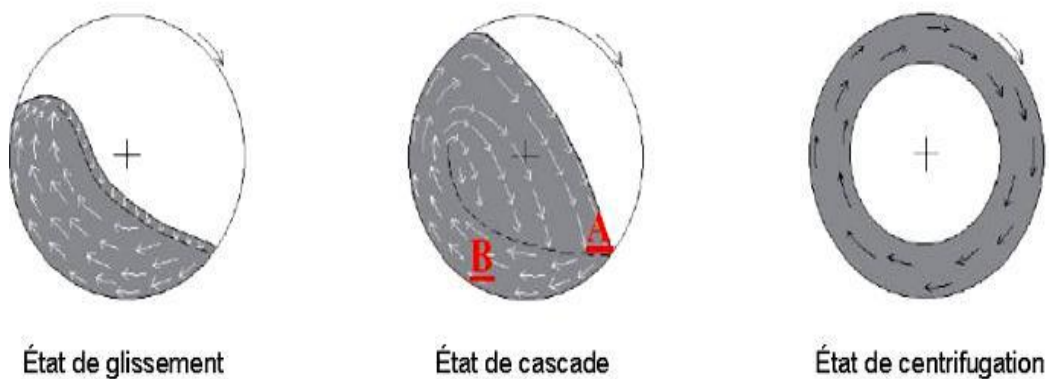


Figure. I-8 : Ecoulements possibles dans un broyeur à boulets [12].

A la sortie du broyeur, le clinker passe au travers d'une grille de décharge empêchant les particules non broyées de sortir. De plus, la poudre obtenue présente 0% de refus au tamis de 90 μ m. Pour optimiser le rendement de l'opération de broyage, la solution mécanique la plus courante est l'adjonction d'un séparateur à air au circuit de broyage. Celui-ci permet d'extraire les particules les plus fines évitant la ré agglomération et facilitant le broyage des particules de taille supérieure. L'énergie économisée peut atteindre 15% [12-13].

Malgré les procédés mécaniques mis au point pour le broyage du clinker, cette opération présente des rendements très faibles. En effet, une grande quantité de l'énergie est dispersée sous

forme de chaleur. En moyenne 2,7% de l'énergie électrique est effectivement utilisée pour fragmenter les particules de clinker [14].

Pour obtenir un ciment aux propriétés hydrauliques actives, le clinker à son tour broyé très finement. C'est également lors du broyage qu'une quantité de gypse (3 à 5% en poids) est ajouté au clinker ; le gypse est indispensable à la régulation de prise du ciment. Le mélange passe dans des broyeurs, il est réduit en poudre fine $< 80\mu\text{m}$; On obtient alors le ciment "Portland". Le produit final (ciment) est stocké dans des silos, en attente de livraison.

1 = C3S ; 3 = C2S ; 4 = C3A+C4AF

- **Le stockage et les expéditions**

La large gamme de produits obtenus est stockée dans des silos avant d'être expédiée en vrac (par Route, fer par voie fluviale) pour 70% de la production ou en sacs pour les 30% restant

- **La salle de contrôle et le contrôle qualité**

Les pilotes de la salle de contrôle conduisent l'usine depuis leurs écrans où s'affichent toutes les Informations.

A chacune des étapes de la transformation de la matière, des échantillons sont automatiquement prélevés et analysés de façon très rigoureuse [4].

I-1-2-3-3 Les Constituants principaux de ciment

- **Le clinker**

Le clinker Portland est obtenu par cuisson, au moins jusqu'à fusion partielle, d'un mélange fixé avec précision de matières premières (farine crue, pâte ou suspension) contenant du CaO, SiO₂, Al₂O₃, et des petites quantités d'autres matières. La farine crue, la pâte ou la suspension doivent être finement divisées, intimement mélangées et être homogènes.

- **Constituants du clinker**

Les principaux composants anhydres obtenus lors du refroidissement rapide du clinker

- Le silicate tricalcique 3CaO.SiO₂ (C3S) (50-70% du clinker).
- Le silicate bicalcique 2CaO.SiO₂ (C2S) (10-30% du clinker).
- L'aluminate tricalcique 3CaO.Al₂O₃ (C3A) (2-15% du clinker).
- L'alumino-ferrite tétracalcique (Ferro-aluminate tétracalcique) 4CaOAl₂O₃.Fe₂O₃ (C4AF) (5-15% du clinker) [28].

Elément	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂
Fourchette(%)	62 à 68	18 à 24	4 à 8	2 à 5	0 à 5	0 à 5	0 à 2	0 à 2	0 à 2
Moyenne (%)	66,6	21,9	6,3	2,5	1	0,8	0,2	0,2	0,2

Tableau.I-3 : Composition chimique du clinker.

Le clinker contient encore en faibles quantités, sous forme de solution solide ou pris dans des combinaisons complexes, des alcalis (Na₂O, K₂O), de la magnésie (MgO), et diverses traces de métaux. La teneur en alcalis et magnésie doit rester faible, car ces matières peuvent influencer défavorablement la stabilité à l'illite du ciment durci.

A l'aide du microscope on peut distinguer la structure minéralogique du clinker en trois phases auxquelles les chercheurs donnent les noms suivants : [15-16]

a) L'alite est le constituant majoritaire du clinker de ciment Portland (50 à 70 %). Il s'agit d'une forme impure (phase cristallisée) du silicate tricalcique de formule C_3S réagissant très rapidement avec l'eau. L'alite est la phase minérale permettant d'obtenir les principaux hydrates à l'origine des propriétés mécaniques du ciment.

b) La bélite (phase vitreuse) et constitue 15 à 30% du clinker se trouve sous forme impure dans le clinker (grains légèrement arrondis et rayés).

c) Les aluminates tricalciques (Célite) phase vitreuse légèrement foncée et claire, constitue 5 à 10% du clinker de ciment CEM I se trouve dans le clinker sous forme impure, il accélère la prise. En quantité importante, il génère une forte chaleur d'hydratation et permet l'obtention de ciment à résistance mécanique initiale élevée. L'hydratation rapide du C_3A est ralentie par l'ajout de sulfates (gypse) qui jouent le rôle de régulateur de prise.

d) Les alumino-ferrites calciques sont des solutions solides de C_2A et C_4F proches du C_4AF , mais sans composition chimique définie. Ils constituent environ 5 à 10% du clinker du ciment CEM I et jouent un rôle peu important dans ses réactions de durcissement. Les oxydes de fer confèrent la couleur grise caractéristique de certains ciments.

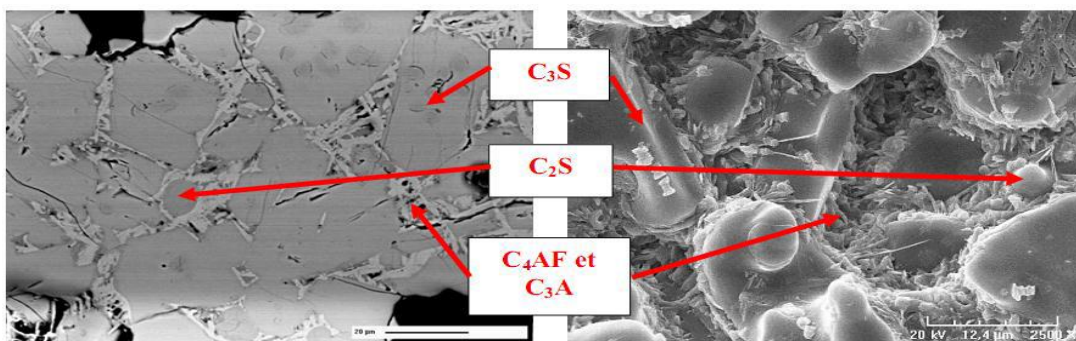


Figure. I-9 : Image d'une section polie d'un clinker réalisée au Microscopie Electronique à Balayage en électrons rétrodiffusés [17].

- **Les différents types des ajouts**

Les ciments avec ajouts (ciments composés) sont obtenus par l'addition, lors de broyage du clinker, du gypse et d'éléments minéraux comme les laitiers de hauts fourneaux, les cendres de centrales thermiques, les fillers calcaires, les pouzzolanes naturelles ou artificielles. Ainsi sont obtenues les différentes catégories de ciments qui permettront la réalisation d'ouvrages allant du plus courant au plus exigeant [10].

- **Le gypse ($CaSO_4$)**

Le clinker « pur » très fin est caractérisé par de courts délais de prise (3 à 5 min), ce qui le rend pratiquement inutilisable. Ce fait est surtout dû à la célite (C_3A) qui s'hydrate rapidement tandis que ses hydrates deviennent rapidement compacts et se cristallisent.

Il s'ensuit que pour ralentir la prise du ciment, il faut lier les hydroaluminates de calcium en d'autres composés. Ce rôle peut bien être joué par le gypse qui réagit énergiquement avec l'hydroaluminat tricalcique et produit un sel insoluble l'hydrosulfoaluminat de calcium ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 31H_2O$). La quantité à introduire doit correspondre à la teneur en C_3A

dans le liant. Lorsque cette teneur en gypse est respectée, l'action des hydroaluminates de calcium se trouve paralysée au moment initial.

- **Ajout minéral actif**

Ces ajouts qui jouent le rôle suivant : d'après leur composition ils se présentent principalement par de la silice amorphe qui réagit activement avec l'hydroxyde de chaux qui se forme lors de l'hydratation des minéraux faisant partie du clinker.

Le rapport entre le clinker et l'adjuvant hydraulique (ajout minéral) est établi en fonction de l'activité de l'adjuvant et de la composition minéralogique du clinker. Plus l'adjuvant est actif, plus il peut fixer l'oxyde de calcium hydraté et moins il faudra de ciment pouzzolanique [18].

Parmi les ajouts les plus utilisés, on mentionne :

- **Les laitiers de haut-fourneau**

On obtient du laitier granulé de haut fourneau par refroidissement rapide de la scorie fondue, c'est-à-dire des résidus provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau. Il est constitué, en masse, d'au moins deux tiers de CaO, MgO et SiO₂, le reste contenant Al₂O₃ et de faibles quantités d'autres oxydes.

Les laitiers existent sous forme de poudre fine, sèche. Ils sont considérés comme un matériau hydraulique latent, qui présente des propriétés hydrauliques après avoir subi une activation convenable, en effet, l'ajout d'eau à un échantillon de laitier vitrifié n'entraîne aucun durcissement du mélange.

L'hydratation des laitiers engendre la formation de CSH (silicate de calcium hydraté), d'aluminates (AC₂H₇) et de silicoaluminates (dérivés de l'ettringite) [6].

- **Les cendres volantes :**

Si la proportion de cendres volantes dans le ciment excède 5 % en masse (constituant principal), seules les cendres volantes satisfaisant aux spécifications suivantes doivent être utilisées :

Les cendres volantes peuvent être de nature silico-alumineuse (Cendres volantes siliceuses (V)) ou silico-calcaire (Cendres volantes calciques (W)). Les premières ont des propriétés pouzzolanique; les dernières peuvent avoir, en plus, des propriétés hydrauliques.

Les cendres volantes sont obtenues par dépoussiérage électrostatique ou mécanique de particules pulvérulentes provenant du courant de gaz des chaudières, alimentées au charbon pulvérisé. Les cendres obtenues par d'autres méthodes ne doivent pas être utilisées dans les ciments conformes à la norme Algérienne [19].

- **Les fumées de silice**

La fumée de silice est un coproduit industriel de la fabrication du silicium métallique ou de divers alliages de Ferro silicium.

Elle est produite lors de la réduction du quartz très pur par du charbon dans un four à arc électrique. Elle est recueillie par filtration des gaz qui s'échappent lors de la combustion.

La fumée de silice se présente généralement sous forme de particules sphériques de très petite taille dont le diamètre moyen est de l'ordre de 0,1 um et composées de silice amorphe (>85%). Ces particules sont essentiellement vitreuses, ce qui en fait un produit hautement pouzzolanique. Elles permettent aussi de compléter la granulométrie des ciments et ainsi d'améliorer la compacité du matériau durci et donc sa résistance mécanique.

- **Les Pouzzolanes**

Les pouzzolanes naturelles sont essentiellement des substances d'origine volcanique ou des roches sédimentaires ayant une composition chimique et minéralogique appropriées. Elles sont essentiellement composées de silice, d'alumine et de fer, et développent naturellement des propriétés pouzzolanique. Les pouzzolanes artificielles correspondent à des produits essentiellement composés de silice, d'alumine et d'oxydes de fer qui, activés thermiquement, développent des propriétés pouzzolanique (argiles ou schistes par exemple) [29].

Les pouzzolanes ne durcissent pas elles-mêmes en présence d'eau, mais elles réagissent à température ambiante en présence d'eau, avec l'hydroxyde de calcium Ca(OH)_2 libéré au cours de l'hydratation du clinker, pour former des CSH et des aluminates de calcium hydratés [6].

I-1-2-4 Les principales catégories de ciment

Les ciments peuvent être classés en fonction de leur composition et de leur résistance normale.

I-1-2-4-1 Classification des ciments en fonction de leur composition

Les ciments constitués de clinker et des constituants secondaires sont classés en fonction de leur composition, en cinq types principaux par les normes NF P15-301 et ENV 197-1. Ils sont notés CEM et numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans leur notation européenne (la notation française est indiquée entre parenthèse) [3]:

- ✚ CEM I: Ciment portland (CPA - dans la notation française).
- ✚ CEM II: Ciment portland composé (CPJ).
- ✚ CEM III: Ciment de haut fourneau (CHF).
- ✚ CEM IV: Ciment pouzzolanique (CPZ).
- ✚ CEM V: Ciment au laitier et aux cendres (CLC).

- La proportion (en masse) des différents constituants est indiquée dans le (Tableau.3) Les constituants marqués d'une étoile (*) sont considérés comme constituants secondaires pour le type de ciment concerné; leur total ne doit pas dépasser 5%. (Les fillers sont considérés comme des constituants secondaires).

	Cim. Portland	Ciment Portland composé		Ciment de haut fourneau			Ciment pozzolanique		Ciment au laitier et aux cendres	
	CPA-CEM I	CPJ-CEM II/A	CPJ-CEM II/B	CHF-CEM III/A	CHF-CEM III/B	CLK-CEM III/C	CPZ-CEM IV/A	CPZ-CEM IV/B	CLC-CEM V/A	CLC-CEM V/B
Clinker (K)	/95%	/80% ≤94%	/65% ≤79%	/35% ≤64%	/20% ≤34%	/5% ≤19%	/65% ≤90%	/45% ≤64%	/40% ≤64%	/20% ≤39%
Laitier (S)	*	6%≤	21%≤	/36% ≤65%	/66% ≤80%	/81% ≤95%	*	*	/18% ≤30%	/31% ≤50%
Pouzzolanes (Z)	*	total	total	*	*	*	10% ≤ total	36% ≤ total	18% ≤ total	31% ≤ total
Cendre siliceuses (V)	*	≤20%	≤35%	*	*	*	≤35% (fumée ≤10%)	≤55% (fumée ≤10%)	≤30%	≤50%
Fumée de silice (D)	*	(fumée	(fumée	*	*	*			*	*
Cendres calcaies (W)	*	de	de	*	*	*	*	*	*	*
Schistes (T)	*	silice	silice	*	*	*	*	*	*	*
Calcaies (L)	*	≤10%)	≤10%)	*	*	*	*	*	*	*
Fillers (F)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

Tableau.I-4 : Désignation des différents types de ciment en fonction de leur composition.

I-1-2-4-2 Classification des ciments en fonction de leur résistance normale

Trois classes sont définies en fonction de la résistance normale à 28 jours; des sous classes "R" sont associées à ces 3 classes principales pour désigner des ciments dont les résistances au jeune âge sont élevées. Ces classes sont notées, classe 32.5, classe 42.5, classe 52.5. Elles doivent respecter les spécifications et valeurs garanties du Tableau 5. Les valeurs entre parenthèses sont les valeurs garanties lorsqu'elles peuvent être inférieures aux valeurs spécifiées.

Classe	Résistance à la compression (MPa) EN 196-1				Retrait à 28 jours P 15-433 (µm/m)	Début de prise EN 196-3 (min)	Stabilité EN 196-3 (min)
	au jeune âge		à 28 jours				
	2 jours	7 jours	mini.	maxi.			
32,5		(17,5)	/32,5 (30)	≤52,5	≤800	/90	≤10
32,5 R	/13,5 (12)	/	/32,5 (30)	≤52,5	≤1 000	/90	≤10
42,5	/12,5 (10)		/42,5 (40)	≤62,5	≤1 000	/60	≤10
42,5 R	/20 (18)		/42,5 (40)	≤62,5	≤1 000	/60	≤10
52,5	/20 (18)		/52,5 (50)			/60	≤10
52,5 R	/30 (28)		/52,5 (50)			/60	≤10

Tableau. I-5 : Les classes de ciment selon la résistance à la compression.

I-1-2-5 Hydratation du ciment Portland

La mise en contact de l'eau et du ciment est appelée le gâchage. Durant cette étape, le ciment s'hydrate selon des réactions complexes. L'étude des mécanismes d'hydratation de chaque phase pure permet une première approche de la compréhension de l'hydratation du ciment Portland.

I-1-2-5-1 Évolution chimique

Le terme "hydratation" dans le domaine du ciment désigne l'ensemble des réactions chimiques qui se produisent entre les constituants du ciment et l'eau. On distingue en réalité dans la pâte de ciment en cours d'hydratation deux types d'évolutions: une évolution chimique et une évolution mécanique [22].

I-1-2-5-2 Principaux produits de l'hydratation

✓ Hydratation des silicates de calcium C3S et C2S

L'hydratation des silicates de calcium se fait selon trois réactions chimiques principales s'amorçant successivement puis devenant simultanées [20].

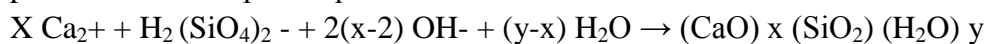
- Dissolution du silicate tricalcique (C3S)

La dissolution intervient dès le gâchage du ciment ce qui rend le milieu très fortement basique. Les espèces majoritaires sont alors les ions calcium, les hydroxydes et les ions silicates ($\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$) formés selon la réaction exothermique suivante :



- Croissance rapide du gel de C-S-H

Après quelques minutes d'hydratation et pendant quelques heures, les silicates, les ions calcium et hydroxydes vont donner lieu à la nucléation d'une phase de silicates de calcium hydratés appelée C-S-H, dont le rapport molaire CaO/SiO_2 est inférieur à 3. Cette précipitation complexe peut être résumée par l'équation :

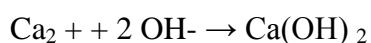


Le produit de cette réaction a fait l'objet de nombreuses études et notamment par diffraction des rayons X [21-22]. Il a été démontré qu'il s'agit d'un gel, pas tout à fait amorphe, comportant une structure cristalline imparfaite. L'ordre à courtes distances ($< 100 \text{ \AA}$) existant au sein des phases C-S-H leur confère la propriété de nanostructures. C'est ce gel complexe qui est à l'origine des propriétés de cohésion du ciment (Fig 11).

- Précipitation de la Portlandite

Quelques heures après le début de l'hydratation, la concentration des ions calcium en solution et le pH deviennent très élevées (entre 12,4 et 13,5).

Dans ces conditions l'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ ou « portlandite ») précipite selon la réaction :



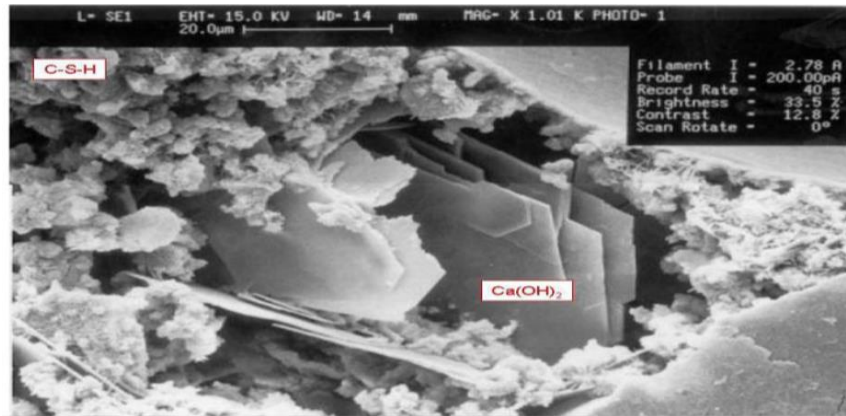


Figure. I-10 : Image de la précipitation des C-S-H et des cristaux de pentlandite (lamelles hexagonales) obtenue en microscopie à balayage G = x 1010 [23].

✓ Hydratation des aluminates

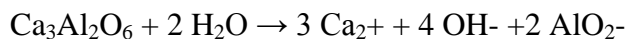
Les phases C3A et C4AF conduisent aux mêmes produits d'hydratation. Cependant, la phase C4AF présente une cinétique d'hydratation plus lente que le C3A.

En présence d'eau, l'aluminate tricalcique réagit selon une réaction auto catalytique rapide conduisant à la formation des aluminates hydratés : C4AH13, C2AH8 qui se recombinent en C3AH6, forme la plus stable à température ambiante. La cinétique de ces réactions est telle qu'au bout de quelques minutes un raidissement rapide de la pâte est observable. Ce phénomène, qui est appelé « prise rapide », augmente la consistance de la pâte sans développer aucune propriété de résistance mécanique et conduit donc à un matériau cimentaire de mauvaise qualité. Par conséquent, l'hydratation de l'aluminate tricalcique est régulée grâce à l'ajout de 5% de gypse ($\text{CaSO}_4, 2 \text{H}_2\text{O}$), permettant d'obtenir des cinétiques d'hydratation comparables à celles des silicates de calcium. Il est alors possible de distinguer quatre étapes dans le processus d'hydratation de l'aluminate tricalcique en présence du régulateur de prise [20].

❖ La phase initiale

Le C3A et le gypse se dissolvent selon une réaction exothermique aboutissant à une solution sursaturée par rapport aux hydrates. Les ions se recombinent alors quasi instantanément en cristaux de trisulfoaluminate de calcium hydraté appelés « ettringite ».

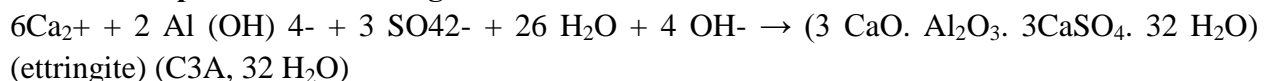
- Dissolution du C3A et du gypse



Et



- Précipitation de l'ettringite



L'ettringite, ainsi formée, précipite à la surface des grains de C3A évitant l'hydratation rapide de ces derniers en C_xAH_y à l'origine du phénomène de prise rapide. Dans les pâtes de ciment, l'ettringite se présente généralement sous forme de fines aiguilles enchevêtrées (**Figure. 11**).

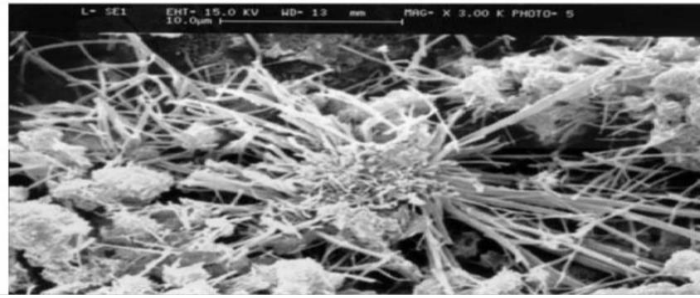


Figure. I-11 : Image des cristaux d'ettringite obtenue en microscopie à balayage [23].

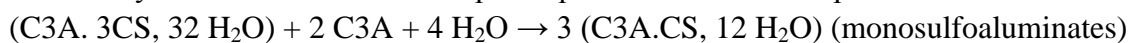
❖ La période dormante

Pendant cette période, l'ettringite continue à se former.

❖ l'épuisement du gypse

10 à 24h après le gâchage, le gypse a été totalement consommé. Ainsi, l'excès de C3A va réagir avec l'ettringite formée précédemment ce qui constitue l'unique source de sulfates.

En présence d'eau, ces constituants vont donner lieu à la formation des monosulfoaluminates de calcium hydratés selon une réaction provoquant la dissolution rapide de l'aluminate en excès :



❖ Réactions à long terme

La formation d'hydrates de moins en moins riches en sulfates induit un ralentissement dans la cinétique des réactions. De plus, au-delà d'un mois, le monosulfoaluminate, l'aluminate et l'aluminoferrite de calcium anhydre (C4AF) réagissent lentement pour former des aluminoferrites de calcium hydraté complexes, incluant des ions aluminates, ferrates, sulfates, calcium et hydroxydes.

I-1-3- Les caractéristiques du ciment portland :

I-1-3-1- La prise (NA230 NF EN 196-3) :

Dès que le ciment anhydre a été mélangé avec de l'eau, l'hydratation commence et les propriétés de la pâte ainsi obtenue sont évolutives dans le temps. Tant que cette hydratation n'est pas trop avancée la pâte reste plus ou moins malléable, ce qui permet de lui faire épouser par moulage la forme désirée. Mais au bout d'un certain temps, les cristaux d'hydrates prenant de plus en plus d'importance, le mélange a changé de viscosité et se raidit, on dit qu'il se fait priser.



Figure.I-12 : Détermination du temps de début de prise.

Le début de prise correspond au moment où l'on observe une augmentation de la viscosité, ou raidissement de la pâte, ce qui, dans la pratique, se mesure au moyen de l'aiguille normalisée (appareil de Vicat) et correspond au temps écoulé depuis le gâchage de la pâte jusqu'au moment où l'aiguille s'arrête à une distance ($d = 6 \text{ mm} \pm 3 \text{ mm}$) du fond de l'anneau de 40 mm de hauteur remplie de pâte pure de ciment (voir figure I-13).

De même, la fin de prise correspond au moment où l'aiguille ne s'enfonce plus dans l'anneau.

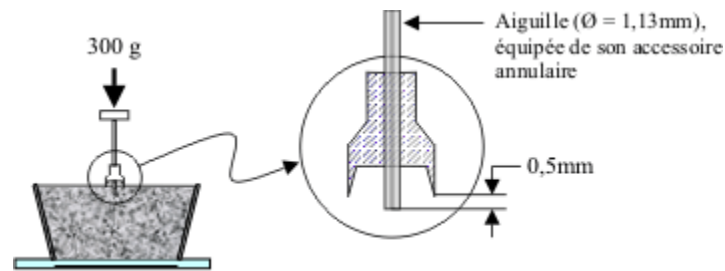


Figure.1-13 : Détermination du temps de fin de prise.

I-1-3-2- Le durcissement :

C'est la période qui suit la prise et pendant laquelle se poursuit l'hydratation du ciment, Sa durée se prolonge pendant des mois au cours desquels les résistances mécaniques continuent à augmenter.

Comme le phénomène de prise, le durcissement est sensible à la température, ce qui conduit notamment en préfabrication, à chauffer les pièces pour lesquelles on désire avoir des résistances élevées au bout de quelques heures.

I-1-3-3-La Finesse de Mouture (finesse de Blaine - NA231 EN196-6):

Elle est caractérisée par la surface spécifique des grains de ciment, exprimée en (cm^2/g). Dans les cas courants, elle est de l'ordre de 3000 à 3500 cm^2/g .

Plus la finesse de mouture est grande, plus la vitesse des réactions d'hydratation est élevée et plus ces résistances mécaniques à un âge jeune sont grandes (voir figure 1-14), par contre plus le ciment est sensible à l'éventuellement et plus le retrait est important. En outre, la finesse de mouture influence la plasticité et la cohésion de la pâte de ciment à l'état frais, ainsi que son pouvoir de rétention d'eau et la ressuée [21].

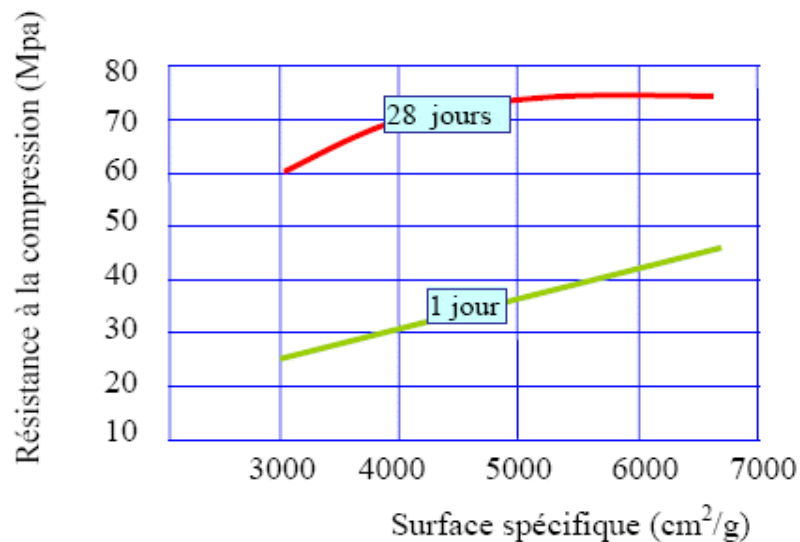


Figure.1-14 : Influence de la surface spécifique sur la résistance à la compression.

I-1-3-4 Le Retrait (NA440 NF P15 433) :

La pâte de ciment se rétracte dans l'air sec (alors qu'au contraire elle gonfle dans l'eau), ce phénomène se poursuivant dans le temps et ceci pendant des durées d'autant plus longues que les pièces sont massives.

C'est le retrait qui est cause des fissures que l'on observe dans des pièces en béton. En fait il existe plusieurs types de retrait :

- Le retrait avant prise dû essentiellement à la perte prématurée d'une partie de l'eau de gâchage par évaporation et dont l'amplitude est dix fois celle du retrait hydraulique classique.
- Le retrait hydraulique, qui découle d'une part de la contraction Le Chatelier (le volume des hydrates est inférieur au volume des constituants de départ) et d'autre part du retrait de dessiccation (contraction au séchage), est de l'ordre de 0,2 à 0,4 mm/m pour les bétons.
- Le retrait thermique, qui est dû à la contraction du béton lors de son refroidissement.
- L'importance du retrait hydraulique, en dehors du facteur de temps, est fonction de nombreux paramètres parmi lesquels:
 - la nature du ciment .
 - le dosage en eau (figure 1-15).
 - la propreté des sables.
 - la forme et la dimension des granulats.

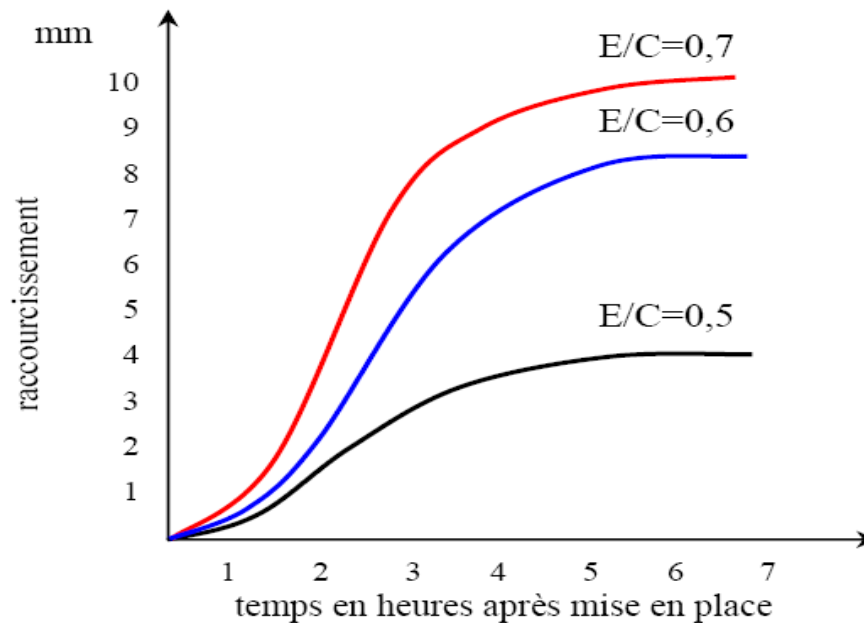


Figure.1-15 : Influence de l'E/C sur le retrait plastique des mortiers.

I-1-3-5 Chaleur d'hydratation (EN196-9 NF P15-436) :

La présente Norme européenne décrit une méthode de mesure de la chaleur d'hydratation des ciments par calorimétrie semi-adiabatique, dite méthode de Langavant. L'essai a pour but de mesurer en continu la chaleur d'hydratation du ciment au cours des tout premiers jours.

La chaleur d'hydratation est exprimée en joules par gramme de ciment.

La méthode semi-adiabatique consiste à introduire un échantillon de mortier fraîchement préparé, dans un calorimètre afin de déterminer, d'après l'évolution de la température, la quantité de chaleur dégagée. À une échéance donnée, la chaleur d'hydratation du ciment contenu dans l'échantillon est égale à la somme de la chaleur accumulée dans le calorimètre et de la chaleur dissipée vers le milieu ambiant pendant toute la durée de l'essai [21].

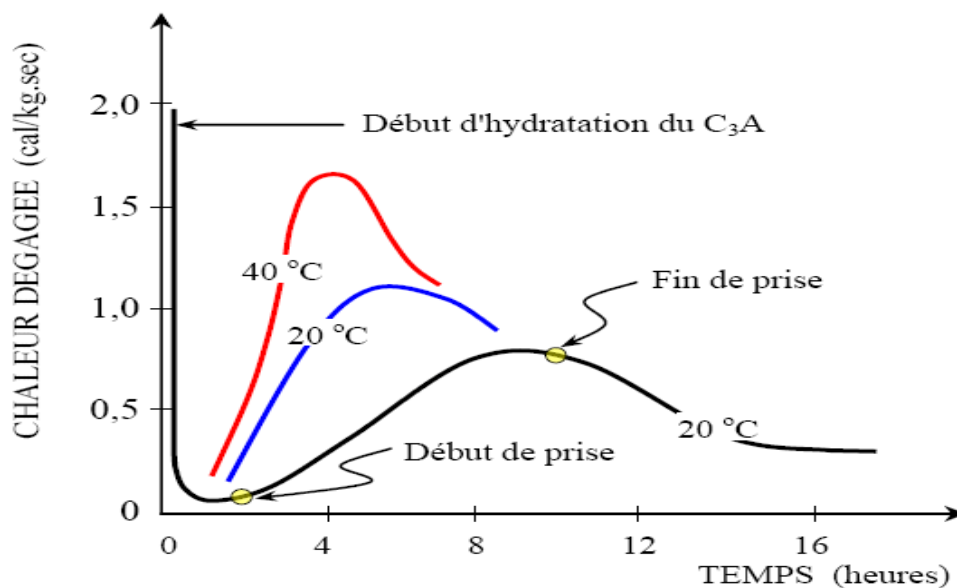


Figure.1-16 : Chaleur dégagée lors de l'hydratation du CPA.

I-1-3-6- Résistance à la compression (NA 234 EN 196-1) :

Les résistances mécaniques des ciments sont déterminées par les essais sur mortier dit "normal", à 28 jours d'âges en traction et en compression des éprouvettes (4 x 4 x 16) cm³. La résistance du mortier est alors considérée comme significative de la résistance du ciment.

Elle dépend de la classe de ciment et est exprimée en MPa (voir Figure 1-19). Le mortier utilisé est réalisé conformément à la Norme EN 196-1. Le sable utilisé est un sable appelé "sable normaliser CEN EN 196-1".

Pour chaque type de ciment, il existe effectivement plusieurs classes de résistances pour lesquelles les fabricants garantissent des valeurs minimales et maximales.

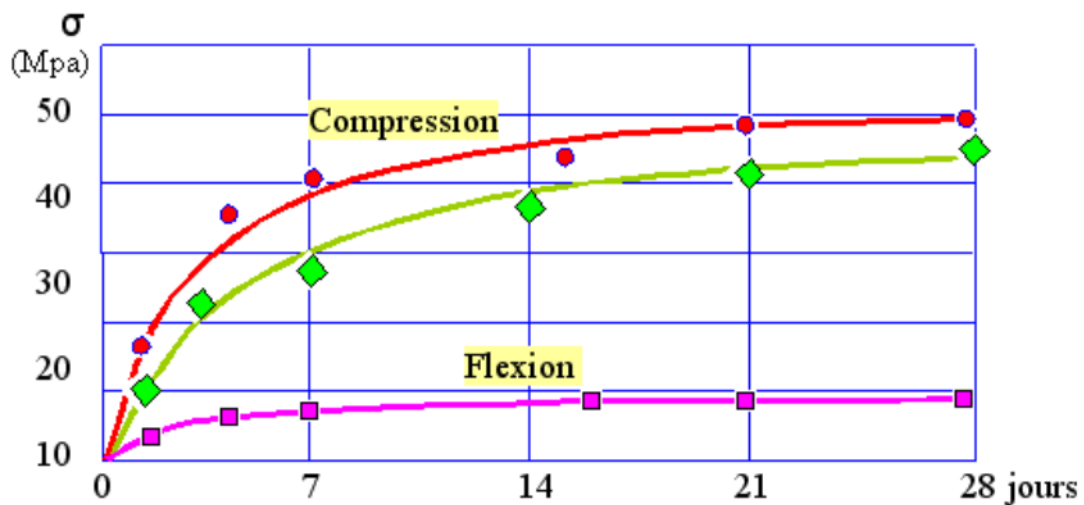


Figure.1-17 : Résistance du mortier normal.

I-2- La pouzzolane

I-2-1- Historique

Dès la fin de l'époque tertiaire, la côte oranaise fut le siège d'une activité volcanique intense. D'est en Ouest, ce volcanisme passe de nature acide à un volcanisme basique où les formations basaltiques prédominent.

L'activité volcanique du tell Oranais s'est manifestée presque entièrement dans sa partie côtière durant la période comprise entre la fin du Miocène et le quaternaire. Cette activité est liée à la seconde phase de l'activité tectonique, phase de la tectonique cassante. Les premières études sur le volcanisme de la Basse-Tafna remontent à 1874 lorsque VELAIN donne une très courte description pétrographique du matériel éruptif et signale entre autre une néphilinite à mélilite dans l'Île de Rachgoun qui a également été décrite par LACROIX (1893).

GENTIL (1903) présente une étude sommaire de quelques laves et rattache celles du plateau de Tadmaya à un basalte à olivine. D'autre part, il indique la présence au Cap d'Acra et décrit des Labradorites sans signaler leurs lieux.

SADRAN (1958) donne une chronologie relative du volcanisme et précise la nature pétrographique des différentes coulées. L'auteur montre que le substratum gréseux des coulées de la Basse-Tafna est constitué de sable à hélix d'âge miocène supérieur, probablement "le Messinien". Enfin, il publie des résultats d'analyses chimiques et relie la tectonique avec le volcanisme.

GUARDIA (1975), présente une étude géologique de toute la région. Il montre que le volcanisme de la Basse-Tafna est totalement indépendant vis-à-vis de la tectogénèse antérieure mais plutôt à une néotectonique profonde.

BELLON et GUARDIA (1980), publient les résultats de l'étude paléomagnétique des roches éruptives de Béni-Saf. D'autre part, ces derniers précisent l'âge de la formation gréseuse qui constitue le substratum.

MEGARTSI (1985) apporte des compléments à l'étude des laves de la Basse-Tafna en les étudiant du point de vue pétrographique et chimique [30].

I-2-2-Localisation du gisement de Béni-Saf

Cette ressource naturelle siliceuse variant du rouge au noir se trouve en abondance dans la région de Béni-Saf ouest de l'Algérie et de Basse-Tafna correspond à un ensemble important de déjections basaltiques qui couvre une superficie d'environ 200 km² .il s'étend sur 30km de cote entre Cap de Sidi Mohamed Bel Ourdini au sud –ouest [figure1].entre Béni-Saf et le Cap Oulassa il se réduit à quelques pointeuses isolées dans les formations sédimentaires , mais à hauteur de la Tafna , il s'étend sur 15km entre l'ileRachgoun et le plateau de Tadmaya .les matériaux d'origine volcanique du massif de Béni-Saf et de la Basse-Tafna peuvent se subdiviser d'après leur mode de gisement en coulées basaltiques et formations pyroclastiques .Après concassage ,broyage ,étuvage et tamisage de ce produit (<80um) , la poudre résultante est récupérée.



Figure. I-18 : Localisation du gisement de Bouhamidi (Béni-Saf) [31].

I-2-3- Définition

La norme [NF P18-308 ,1965] décrit la pouzzolane comme une roche naturelle, constituée par des scories volcaniques, essentiellement composée de silice (SiO_2), d'alumine (Al_2O_3) et d'oxyde ferrique (Fe_2O_3).

La norme [ASTM C 618-3, 2003] la décrit comme étant un matériau siliceux et alumineux qui ne possède par lui-même aucune valeur liante mais qui sous forme de poudre très fine et en présence d'humidité, réagit chimiquement avec l'hydroxyde de calcium à des températures ordinaire pour former des composés possédant des propriétés liantes.

I-2-3-1- Nature du matériau pouzzolanique de Béni-Saf

Parmi les massifs volcaniques déjà cités, celui de Béni-Saf et de la Basse-Tafna donne lieu à un certain nombre d'épaulements remarquables dans lequel on reconnaît les vestiges des principaux cratères. En raison de la grande homogénéité de ce massif, les gisements qu'il contient ne doivent pas se différencier [30].

I-2-3-2- La couleur des pouzzolanes

Les oxydes de fer peuvent être retenus comme "indicateur coloré" des pouzzolanes puis qu'ils sont susceptibles de donner d'utiles renseignements sur les degrés d'oxydation atteints dans les pouzzolanes rencontrées.

Les analyses chimiques réalisées sur les pouzzolanes de provenances très différentes (France, Italie, Madagascar, Réunion, Martinique, Guadeloupe, Zaïre et Ruanda) tendent bien à montrer que la couleur dominante de celles-ci reste étroitement liée au rapport des pourcentages pondéraux des oxydes ferreux et ferriques [29]. 32OFeOFe

La coloration des matériaux ne révélait que des variations du degré d'oxydation du fer présent et ne pouvait donc pas affecter la partie silicatée. De ce fait, le préjugé selon lequel les pouzzolanes noires présenteraient une qualité plus médiocre que celles des pouzzolanes rouges est actuellement dénué de tout fondement [30].

I-2-3-3- Qualités des roches utiles du gisement Bou-Hamidi

L'étude géologique faite en 1985 par l'UREG Boumerdes sur la qualité et l'activité pouzzolanique des roches utiles emploi tableau les du gisement Bouhamidi à donner les résultats suivants:

N°	Variétés lithologiques	Activité (mg/g)
01	Pierre ponce	70
02	Tuf calcaire finement poreux	82
03	Pierre ponce grise et brunâtre	77
04	Tuf basaltique finement poreux	95
05	Tuf compact	94
06	Basalte gris clair poreux	85
07	Basalte marron	84
08	Brèche tufeuse cimentée	100
09	Pierre ponce en matériau carbonaté	84
10	Pierre ponce agglutinante brune	100
11	Pierre ponce en matériau carbonaté marans claire	67
12	Tuf basaltique finement poreux, brunâtre et cimenté	71
13	Agglutiné imprégné de masse vitreuse	81
14	Tuf compact	80

Tableau.I-6 : Qualité et activité de la roche du gisement Bouhamidi [31].

I-2-3-4- Réaction pouzzolanique

La réaction pouzzolanique signifie formation dans la réaction de liaison. Les propriétés de la pâte qui contient les produits de réaction sont indépendantes de la réactivité pouzzolanique.

L'action pouzzolanique se caractérise donc par deux aspects distincts qui sont la quantité totale de chaux (la chaux utilisée est une chaux éteinte ayant pour formule chimique $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Portlandite ou hydroxyde de calcium) qu'une pouzzolane est capable de fixer ; et la rapidité de fixation de la chaux par la pouzzolane (la réactivité de la pouzzolane), cette réaction est lente c'est-à-dire se manifeste après 28 jours.

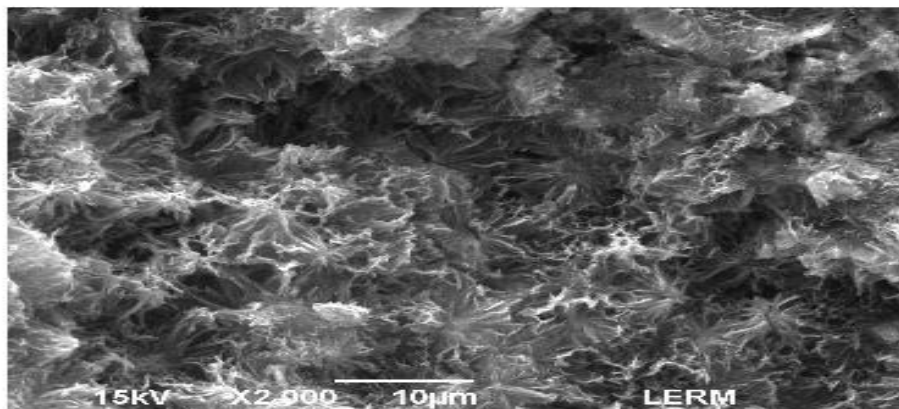


Figure. I-19: Gel de C-S-H.

Les pouzzolanes naturelles contiennent de 60 à 85% de silice (SiO_2) et d'alumine (Al_2O_3). En présence d'eau et de chaux, à des températures ordinaires, comme dit la norme, elles vont former des silicates de calcium hydratés, semblables à ceux produits par l'hydratation du silicate tricalcique (C3S) (C_3A , SiO_2), composé principal du ciment Portland.

Les réactions pouzzolanique et hydraulique peuvent s'écrire globalement comme suit : [24] [25].

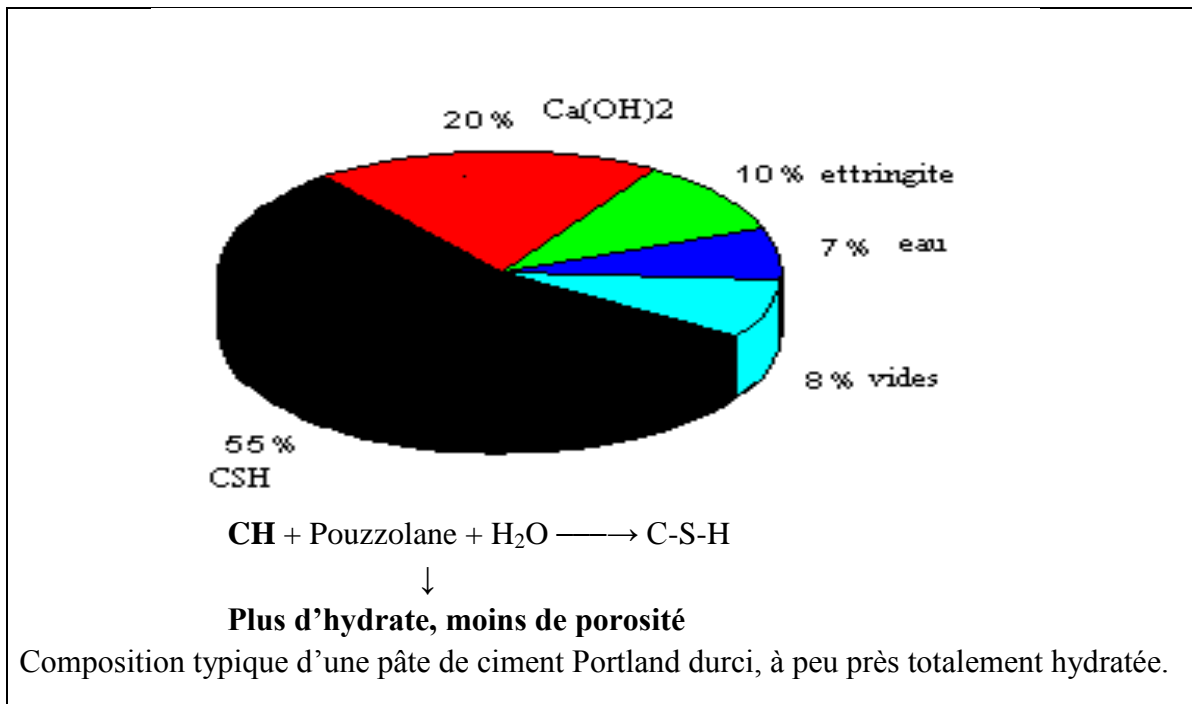
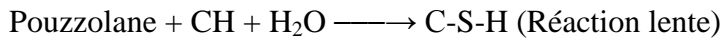


Figure.I-20 : les réactions d'hydratation ciment et de la pouzzolane [32].

Le comportement du ciment avec ajout minéral est déterminé par trois caractéristiques de la réaction pouzzolanique de l'ajout :

- La réaction est lente, le dégagement de chaleur et le développement des résistances seront également lents.
- Au lieu de fournir de la chaux, comme dans le cas du ciment Portland, la réaction pouzzolanique en consomme et améliore la résistance du béton en milieu acide.
- Les produits d'hydratation remplissent les pores capillaires et augmentent la résistance et l'imperméabilité des bétons par affinage de ces pores capillaires et par transformation des gros cristaux de CH en un produit d'hydratation faiblement cristallisé (affinage des grains) [32].

I-2-3-4-1-Chaleur d'hydratation

Le remplacement du ciment par une pouzzolane diminue de façon significative la chaleur d'hydratation du ciment, et par conséquent la fissuration d'origine thermique du béton (**Figure. 16**).

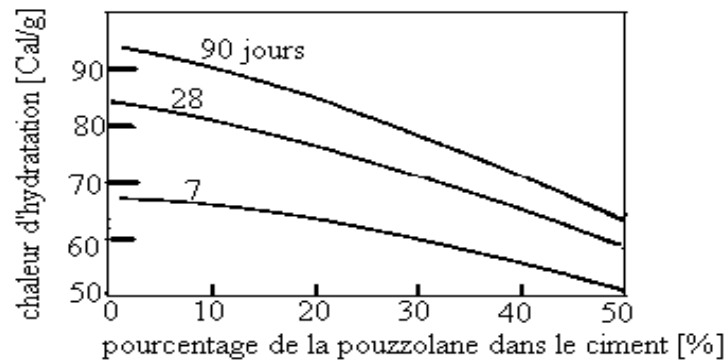


Figure.I-21 : Effet des ajouts (la pouzzolane naturelle d'Italie) sur la chaleur d'hydratation du ciment portland [32].

La chaleur d'hydratation des ajouts pouzzolanique est égale à environ la moitié de celle du ciment portlands.

I-2-3-5- Types de pouzzolane

I-2-3-5-1-Pouzzolane naturelle

La Pouzzolane naturelle est un produit d'origine volcanique (verre volcanique, pierre ponce, zéolite...) ou sédimentaire (terre à diatomées, trass.....), composé essentiellement de silice alumine et fer.

Elle est formée d'une phase mal cristallisée, amorphe et de grande surface spécifique, qui réagit rapidement avec la chaux libérée pendant l'hydratation du ciment pour former de nouveaux cristaux de silices et d'aluminate de calcium hydraté qui participent au développement des résistances mécaniques et chimiques. Selon la norme DE L'ASTMC 18, la pouzzolane se définit comme étant un matériau siliceux et alumineux qui ne possède en lui-même aucune ou à peu près aucune valeur liante mais qui sous forme de poudre très fine et en présence d'humidité réagit chimiquement avec l'hydroxyde de calcium, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ à des températures ordinaires pour former des composés possédant des propriétés liantes [29].

I-2-3-5-2- Pouzzolane artificielle

Les pouzzolanes artificielles sont toute matière essentiellement composées de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolanique. Elles sont des déchets des efférentes industries. On distingue. Soit des résidus de fabrication industrielle tel que. le mach fers , cendre de bois ou d'houille , soit des débris de brique et de tuile fabriquées avec des argile pures des températures modérées . On distingue aussi le schiste cuite, et les déchets de l'industrie à base de méta kaolinite [26].

I-2-3-6- Effet de La pouzzolane

La pouzzolane confère aux bétons les propriétés suivantes :

I-2-3-6-1-A l'état frais

Les pouzzolanes améliorent l'ouvrabilité, la plasticité, la rétention d'eau et une bonne homogénéité couplées à une réduction de la tendance au ressuage. Elles réduisent la chaleur d'hydratation, cet effet se traduit par une réduction sensible de la fissuration.

I-2-3-6-2-A l'état durci

Les pouzzolanes améliorent la cohésion interne ainsi qu'une augmentation de compacité de la pâte de ciment. La réduction de porosité qui en découle pour toute la matrice ciment se traduit par une série d'effets très favorables.

- ✚ accroissement de la résistance finale.
- ✚ Légère diminution du retrait et du fluage.
- ✚ Réduction de la perméabilité à l'eau jusqu'à des valeurs d'étanchéité.
- ✚ Amélioration de la résistance aux sulfates, aux chlorures et à d'autres types d'agressions chimiques.
- ✚ Protection des armatures contre la corrosion.
- ✚ Une réduction générale de la teneur en hydroxyde de calcium dans le béton avec deux conséquences bénéfiques.
- ✚ Une réduction notable du risque d'apparition d'efflorescences de chaux sur les faces Exposées du béton.
- ✚ Une très nette amélioration de la résistance du béton aux eaux douces [26].

I-2-3-7- Propriété de la pouzzolane

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.

I-2-3-7-1- Propriétés hydrauliques

La pouzzolane est capable de réagir en présence d'eau avec de l'hydroxyde de chaux pour donner naissance à des composés nouveaux, stable, peu solubles dans l'eau et possédant des propriétés liantes [27].

I-2-3-7-2- Propriétés physiques de remplissage

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

I-2-3-8- L'utilisation de la pouzzolane

La pouzzolane est utilisée essentiellement.

- L'hiver, elle sert pour le sablage des routes verglacées.
- Dans les travaux publics elle est utilisée comme matériau de remblai léger, pour la réalisation de terrains de sport : piste d'athlétisme, amendement terrains gazonnée, carrière à chevaux.
- Dans l'industrie ajoutée au ciment elle permet la confection de matériaux réfractaires comme les boisseaux de cheminées de parpaing de béton léger très utile pour la construction de bâtiment ; elle entre dans la fabrication d'argiles à tuiles.
- Elle possède des propriétés intéressantes pour l'isolation thermique et phonique [28].

Conclusion

Les recherches qui sont présentées lors de cette étude bibliographique, notamment sur le plan expérimental, nous montrent que le procédé de fabrication du ciment portland nécessite une énergie importante et dégagent du CO₂ et de la poussière causant la pollution de l'environnement, d'où le recours à l'utilisation des ajouts cimentaires comme remède à ces problèmes ce qui permet de :

- diminuer la quantité de clinker utilisé d'où un gain d'énergie.
- préserver l'environnement.
- améliorer les propriétés du ciment.

Chapitre III :

Matériaux et formulation
et
méthodologie d'essais

Introduction :

Ce travail expérimental est réalisé dans le contexte de l'évaluation de l'influence de l'ajout de la pouzzolane sur le ciment portland.

Dans cette première partie nous exposons la partie expérimentale concernant la caractérisation des matériaux utilisés dans la fabrication des différents mélanges de mortier.

Nous présentons aussi la méthode de composition qui nous permettra d'établir les différentes formulations des mortiers.

Nous avons effectué une série d'essais physiques, et mécaniques sur les matériaux étudiés et sur les mortiers élaborés à partir de ces derniers. Ces essais étaient effectués dans le laboratoire de contrôle qualité de Lafarge suivant la condition :

Une salle maintenue à une température de $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ et à une humidité relative supérieure ou égale à HR 50 %.

II- Matériaux et formulation et méthodologie d'essais

II-1-Matières Premières

Les Principaux composants des ciments élaborés sont :

- Pouzzolane.
- Clinker.
- Gypse.

II-1-1-La pouzzolane

La pouzzolane naturelle utilisée dans tous les essais est sous forme d'une poudre résultante de concassage ; étuvés pendant 12 heures à une température de 100°C afin d'éliminer l'humidité existante dans la pouzzolane, ensuite broyées très finement.

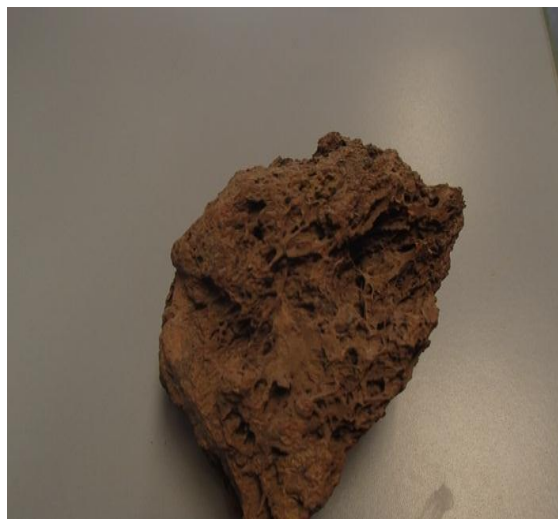


Figure.II-1 : Scorries de la pouzzolane naturelle de Beni-Saf avant broyage.

➤ Analyses Chimiques de Pouzzolane Bani-saf

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Chloride	Paf
43,30	17,65	10,29	8,15	3,56	0,12	1,38	3,50	0,012	5,46

Tableau II-1: Composition chimique élémentaire de la pouzzolane.

➤ Caractéristiques physiques

Les caractéristiques physiques de la pouzzolane sont données dans le Tableau suivant :

Caractéristiques physiques	Unités	Valeurs
Surface spécifique Blaine	cm ² /g	4776
Masse volumique absolue	g/cm ³	2.82

Tableau.II-2 : Caractéristique physique de la pouzzolane.

II-1-2 Le clinker :

La composition chimique en oxydes du cru détermine la composition minéralogique du clinker, donc on doit apporter un grand soin aux matières introduites dans le four pour obtenir un taux élevé de C_3S .

Les matières premières utilisées pour la fabrication du clinker de la cimenterie de Hammam Dalâa et les caractéristiques physiques sont indiquées dans le Tableau (II-3).

Clinker	Clinker de Hammam Dalaa
Ingrédient du clinker	Calcaire
	Argile
	Sable de dune (Bousâada)
	Minerai de fer
Densité apparente	1,32
Dureté	37

Tableau II-3 : Principaux constituants du cru de clinker.

II-1-3 Le gypse :**II-1-3-1 Composition chimique :**

Le dosage du gypse naturel (sulfate de calcium déshydraté, $CaSO_4 \cdot 2H_2O$) a été maintenu constant à 4% .Dans la préparation de tous les ciments, pour deux raisons, réguler la prise et ne pas masquer l'influence de la teneur en ajouts sur les propriétés mécaniques du ciment.

Les compositions chimiques du gypse sont données par le Tableau (II-3).

Eléments(%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P.F	CL
Gypse de Biskara	1,98	0,45	0,17	32,08	2,88	39,4	0,1	0	24,12	0,01

Tableau II-4 : Composition chimique du gypse.

Le rôle principal de gypse :

- Contribue la résistance à 02 jours.
- Régulateur de prise.
- Aide de broyage de ciment.

II-2 Formulation des Ciments:**II-2-1 Composition pondérale des différents ciments :**

Les différents ingrédients (Clinker, Pouzzolane et Gypse) ont été concassés séparée à une dimension inférieure à 100um, Puis mélangés soigneusement à différentes proportions :

pouzzolane(%)	0	10	20	30
Clinker (%)	95	85	75	65
Gypse (%)	5	5	5	5

Tableau.II-5 : Composition pondérale des différents ciments.

II-2-2 Analyses chimiques des différents ciments préparés :

Les résultats de la composition chimique des (04) ciments préparés sont présentés dans le Tableau (II-5).

L'ajout pouzzolane substitué à divers pourcentages (0%, 10%, 20%, 30%).

Dans cette étude, nous avons fait varier le pourcentage de la pouzzolane dans le ciment par la méthode de substitution (remplacement partiel du clinker par pouzzolane) afin d'étudier son effet sur les propriétés physico-chimiques du ciment confectionné avec l'addition minérale et le comportement mécanique du mortier.

Les propriétés physico-chimiques du ciment à l'état anhydre et l'état hydraté (composition chimique, poids spécifique, finesse, refus, consistance des pâtes de ciment et temps de prise, expansion et chaleur d'hydratation), ainsi que les caractéristiques des mortiers préparés à leurs bases, telles que, le retrait, le gonflement, le comportement mécanique (résistances mécaniques à la compression et à la flexion).

L'incorporation de la pouzzolane dans le clinker à différents pourcentages : (0% ,10% ,20%, 30%), augmente le pourcentage des oxydes (SiO_2 , Al_2O_3 , SO_3 , MgO , Fe_2O_3) et diminue le taux d'oxyde (CaO).

Pouz (%)	SampleName	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	CaO	MgO	SO₃	K₂O	Na₂O	Cl	PAF
0	CEM- CPA	20,87	5,10	3,42	62,36	1,88	2,92	0,68	0,11	0,017	1,80
10	CEM- CPA 1	24,83	5,77	4,89	56,55	2,02	2,82	0,90	0,61	0,016	2,20
20	CEM- CPA 2	27,10	6,80	5,60	51,20	2,48	2,85	0,92	0,72	0,015	2,89
30	CEM -CPA 3	28,00	6,96	5,85	50,10	2,53	2,89	0,98	0,78	0,018	3,21

Tableau II-6 : Composition chimique des ciments préparés.

II-2-3 Analyses minéralogiques DRX des ciments préparés.

Pouz (%)	Alite_Sum	Belite_beta	Alum_cubic	Alum_ortho	Alum_Sum	Ferrite	Lime	Portlandite
0	60,03	13,86	2,57	0	2,57	13,03	2,22	0,11
10	63,05	7,8	2,27	0,21	2,48	13,74	1,1	0,12
20	62,72	5,18	1,66	0,21	1,88	14,61	0,96	0,12
30	53,98	3,73	0,94	0,49	1,42	12,51	0,71	0,1

Tableau II-7 : Analyses minéralogiques DRX des différent ciments.**II-3 Formulation des mortiers normalisés :**

Le mortier est constitué par le mélange suivant :

- 1350 g sable normalisé (Norme EN 196-1).
- 450 g du ciment.
- 225 g l'eau de gâchage.
-

II-3-1 L'eau de gâchage :

L'eau utilisée pour la confection des mortiers est une eau distillée préparé au laboratoire de la cimenterie (Lafarge M' sila)

II-3-2-le sable :

Dans notre étude expérimentale, nous avons utilisé un sable normalisé (SABBIA NORMALE STANDARD SAND) certifié CEN, EN 196-1 conforme ISO 679 :2009.

Un sable normalisé, est un sable naturel, siliceux notamment dans ses fractions les plus fines. Il est propre, les grains sont de forme généralement isométrique et arrondi. Il est séché, criblé et préparé dans un atelier moderne offrant toutes garanties de qualité et de régularité dans le laboratoire d'essais des matériaux de la ville de paris contrôlé par le L.E.M.V.P. Le sable est conditionné en sachets de polyéthylène contenant chacun 1 350 #177,5 g.

**Figure. II-2 : Sachet de sable normalisé.**

II-4 Mesures expérimentales:**II-4-1 Essai sur ciment anhydre :****II-4-1-1 Détermination de La densité**

La densité ou bien la masse volumique absolue est déterminée par pycnomètre Automatique.



Figure.II-3 : Flacon le chatelier.

Mode Opérateur :

- Peser 64 gr de ciment dans un verre de montre.
- Remplir le pycnomètre préalablement lavé et séché, jusqu'à trait de gauge inférieur, avec du benzène, kérosène ou pétrole le mettre dans un marie entre 22 et 18 °C jusqu'à stabilité du niveau, le réajuster si nécessaire.
- Introduire les 64 gr de ciment par accouts dans le densimètre à l'aide d'un entonnoir.
- Tasser doucement en tapotant soigneusement le pycnomètre sur la paillasse en plaçant un chiffon dessous pour éviter de casser le densimètre et pour chasser toutes les bulles d'air.
- Laisser reposer le pycnomètre 20 minutes jusqu'à le tassement du ciment.
- Lire la nouvelle graduation du déplacement de volume du trait de gauge « 0, à la nouvelle graduation ». (Voir Figure. 01)
- Calcul de la masse spécifique :
- $M_s = \text{masse du ciment [g]} / \text{volume déplacé [cm}^3\text{]}$.
- Les résultats doivent être reproductibles au moins de 0,01 prés.

II-4-1-2-Détermination de La finesse de mouture (finesse de Blaine)

La finesse de mouture d'un ciment est caractérisée par sa surface spécifique. La surface spécifique a été déterminée par la méthode du Perméabilimètre Blaine Automatique selon la norme NF P15-442.



Figure.II-4 :Le densimètre de le chatelier.

Objectif de l'essai

Les ciments se présentent sous forme de poudre finement divisée. Cette finesse est une caractéristique importante: lors du gâchage, plus la surface de ciment en contact avec l'eau est grande et plus l'hydratation est rapide et complète.

La finesse d'un ciment est généralement exprimée par sa surface massique: c'est la surface totale des grains contenus dans une masse unité de poudre. La surface massique est généralement exprimée en cm^2 de surface des grains de ciment par gramme (g) de poudre. La surface spécifique du ciment se situe entre 2500 et 4500 cm^2/g .

Mode opératoire:

a. Préparation du lit de ciment compacté.

1. Agiter l'échantillon de ciment dans un bocal bouchon pendant 2 minutes.
2. Attendre 2 mn et remuer doucement avec une tige sèche.

b. Détermination de la surface spécifique Blaine pour le ciment:

- Placer la grille au fond de la cellule et mettre un papier filtre de 12,7 mm
- Peser la quantité de ciment calculée lors de l'étalonnage du Blaine mètre, soit M.
- $m = \rho V (1 - e)$
- Où :
 - ρ est la densité du ciment et V est le volume de la cellule.
 - e est la porosité.
 - Introduire cette quantité dans la cellule en utilisant un entonnoir propre et sec.
 - Tapoter tout doucement la cellule pour niveler la couche supérieure du ciment.
 - Placer un autre papier filtre au-dessus de la couche.
 - Tasser avec précaution à l'aide du piston réservé à cet effet.
 - Vérifier le niveau d'huile qui doit être au trait (1) dans le tube.
 - A l'aide de la poire aspirante pomper et ouvrir le robinet, l'huile remonte à la graduation (4).
 - Fermer le robinet, puis laisser le liquide descendre doucement
 - Mesurer le temps de passage d'huile de trait 2 au trait 3.
 - Lire directement en fonction du temps, sur le tableau donnant SSB en fonction du temps, la valeur de la surface spécifique Blaine, ou appliquer la formule ci-dessous.



II-4-1-3-Détermination du refus pour les matières fines:

- Pour la farine crue, Alimentation Four, Silo Homo le refus est déterminé sur tamis de 90 et 212 μm .
- Pour le ciment le refus est déterminé sur des tamis de 45 et 90 μm .



Figure.II-5: Tamiseuse alpine (laboratoire de Lafarge M'sila) alpine en service

- Vérifier le bon fonctionnement de l'alpine.
- Prélever $m= 10$ grammes de matière directement de l'échantillon bien homogène,
- Tamiser sur tamis 90 μm pendant 2 minutes a 2000 P.
- Peser m_2 et calculer le refus comme suit:
- Refus $_{90\mu\text{m}} = \frac{m_1}{m} \times 100\%$
- Tamiser, le résidu obtenu sur tamis 90 μm sur tamis 212 μm pendant 2minutes a 2000 P.
- Peser m_2 et calculer le refus sur tamis 212 μm comme suit:
- Refus $_{212\mu\text{m}} = \frac{m_2}{m} \times 100\%$
- Saisir les résultats sur les données manuelles sur le QCX.

B. Alpine hors service:

Tamiser avec de l'eau du robinet, sécher et calculer les refus comme précédemment.

II-4-2 Essai sur ciment hydraté

II-4-2-1-Détermination de la consistance normale

Objectif de l'essai

La consistance normalisée de la pâte de ciment est déterminée à l'aide de l'appareil de Vicat selon la norme NF EN 196-3.

Le but de cet essai est de déterminer la quantité optimale d'eau de gâchage pour l'obtention d'un bon mortier.



Figure.II-6 : Malaxeur et l'appareil de vicat.

Mode opératoire :

Malaxage de la pâte :

- Peser 500 grammes de ciment à un gramme près.
- Prendre un volume d'eau distillée à l'aide d'une éprouvette et l'introduire dans la cuve du malaxeur.
- Ajouter soigneusement le ciment à l'eau pour éviter toute perte d'eau ou de ciment.
- La durée de cette opération est de 5 à 10 secondes. Noter la fin de cette opération comme le temps zéro.
- Mettre le malaxeur en marche immédiatement à vitesse lente pendant 90 secondes.
- Au bout de ces 90 secondes, arrêter le malaxeur pendant 15 secondes durant lesquelles toute la pâte adhérant à la cuve du malaxeur doit être grattée et remise dans la gâchée.
- Remettre alors la machine en route à vitesse lente pour une nouvelle durée de 90 secondes, le temps total de fonctionnement est de 3 minutes.

Remplissage du moule

- Introduire immédiatement la pâte dans le moule préalablement placé sur un support en verre, légèrement graissé et le remplir sans tassement ni vibration excessive.
- Enlever l'excès par un mouvement de vas et viens effectuer avec un outil présentant un bord droit de façon à avoir la face supérieure de la pâte lisse.

Essai de pénétration

- Régler l'appareil préalablement muni de la sonde.
- Placer le moule et la plaque de base sur l'axe de la sonde de l'appareil de Vicat.
- Abaisser la sonde avec précaution jusqu'au contact de la pâte, observer une pause de 1 à 2 secondes.
- Libérer alors les parties mobiles de la sonde (la sonde doit pénétrer verticalement au centre de la pâte). La libération de la sonde doit avoir lieu 4 minutes après l'instant zéro.
- Effectuer la lecture de l'échelle à la fin de pénétration ou 30 secondes après la libération.
- La lecture doit être acceptée si elle est de 6 ± 1 millimètre du bord inférieur de la surface de la pâte.

II-4-2-2-Détermination du temps de prise

Le temps de prise est déterminé à l'aide de l'appareil de Vicat Automatique muni d'une aiguille selon la norme NF EN 196-3 à la température de $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$.

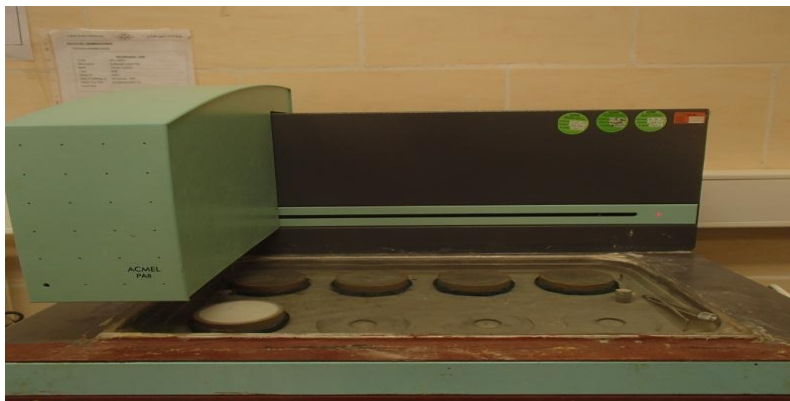


Figure.II-7 : Appareil de Vicat automatique pour la détermination des temps de prise.

Mode opératoire :

Pour mesurer le temps de prise il faut :

- Placer le moule dans l'appareil de Vicat automatique pour connaître le début et la fin de prise du ciment.
- Le temps de début de prise correspond à la lecture de 4 ± 1 millimètres du fond du moule, noté à partir du temps 0.
- Le temps de fin de prise correspond à la lecture de 0,5 millimètres de la surface du moule, noté à partir du temps zéro.

II-4-2-3-Détermination de l'expansion :

Objet de l'essai:

Cette instruction a pour objet la détermination de la stabilité de la pâte de ciment selon les spécifications de la Norme européenne EN 196-7.

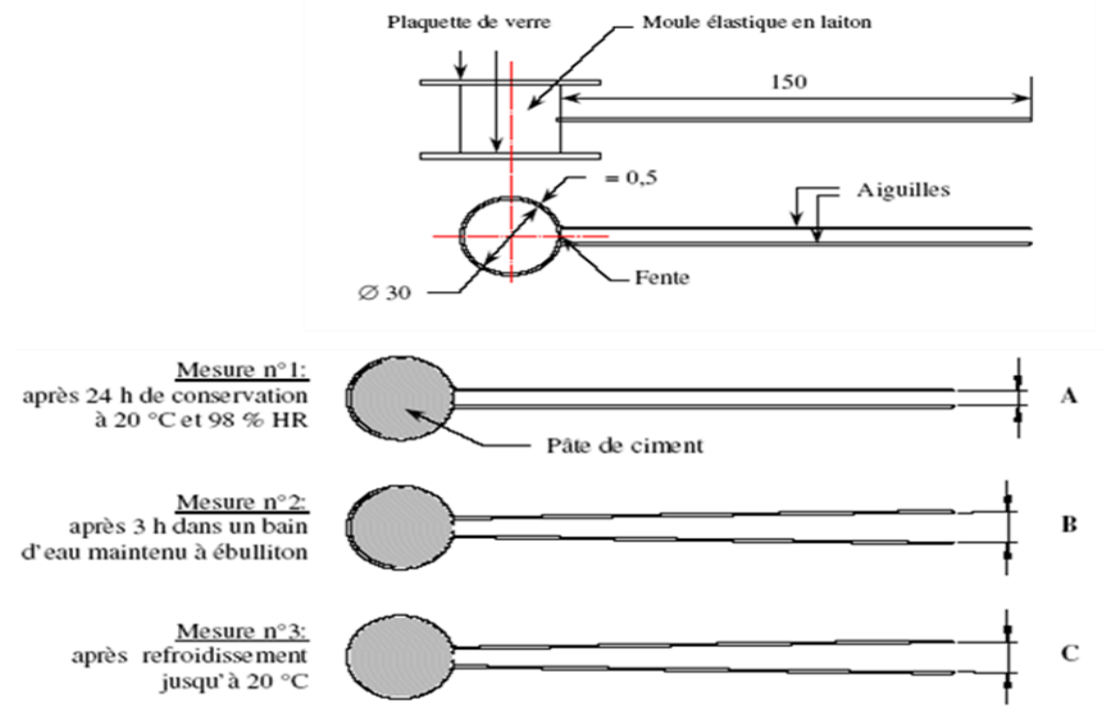


Figure.II-8 : Aiguille de le Chatelier

Mode opératoire :

a. La pâte une fois normalisée, servira au remplissage des moules le Chatelier.

b. Remplissage du moule.

- Travailler sur un nombre de deux moules au moins.
- Introduire immédiatement, à l'aide d'un objet adéquat, la pâte de ciment dans le moule Le Chatelier, préalablement placé sur une plaque de verre plane, légèrement graissée et le remplir sans tassements ni vibrations excessif.
- Enlever l'excès de pâte par un mouvement de va et vient effectuer avec précaution, avec un outil présentant un bord droit de façon à avoir la face supérieure de la pâte lisse.
- Mesurer les écarts entre les deux branches du moule
- Etiqueter le moule et le couvrir d'une plaque de verre légèrement huilée et si nécessaire, munie de poids supplémentaire et placer alors immédiatement l'appareil complet dans la chambre (armoire) humide pendant $24 \pm 0,5$ h à $20 \pm 1^\circ\text{C}$ et une humidité d'au moins 98 %.
- Mesurer les écarts entre les deux branches du moule Le chatelier avant leur introduction dans la bouilloire. Comparer les valeurs, (Elle permet d'avoir une idée du comportement de la pâte).
- Placer les moules dans une bouilloire pendant **03 h \pm 5 min.**

Calcul.

- Laisser refroidir a la température de la salle $20 \pm 2^\circ\text{C}$.
- Pour chaque moule, mesurer la différence entre les écarts, avant et après le traitement des moules dans l'eau bouillante.

L'expansion est définie comme suit, soit :

- L_1 , l'écart avant la cure dans l'eau bouillante,
- L_2 , l'écart après la cure dans l'eau bouillante,
- L'expansion est donc égale à la différence,

$$E = L_2 - L_1, \text{ (mm)}$$

II-4-2-4-Détermination de la chaleur d'hydratation :**Principe de l'essai :**

La méthode semi-adiabatique consiste à introduire un échantillon de mortier fraîchement préparé, dans un calorimètre afin de déterminer, d'après l'évolution de la température, la quantité de chaleur dégagée. À une échéance donnée, la chaleur d'hydratation du ciment contenu dans l'échantillon est égale à la somme de la chaleur accumulée dans le calorimètre et de la chaleur dissipée vers le milieu ambiant pendant toute la durée de l'essai.

L'échauffement du mortier est comparé à la température d'un échantillon inerte dans un calorimètre de référence.



Figure.II-9 : Appareil de chaleur d'hydratation.

Mode opératoire :**1 Composition du mortier :**

La composition du mortier doit être conforme à l'EN 196-1 et l'échantillon pour essai doit avoir une masse totale de $(1\ 575 \pm 1)$ g. Chaque gâchée de mortier doit être constituée de $(360,0 \pm 0,5)$ g de ciment ; $(1\ 080 \pm 1)$ g de sable, provenant d'un échantillon de sable

normalisé CEN conforme aux exigences de l'EN 196-1 et $(180,0 \pm 0,5)$ g d'eau distillée ou déminéralisée.

Note :

Comme il n'est pas possible de récupérer la totalité des matériaux versés dans le récipient du malaxeur, il convient que la gâchée de mortier soit légèrement supérieure à 1 575 g, les proportions en masse des divers constituants étant maintenues.

2 Malaxage :

Conserver le ciment, l'eau, le sable, la boîte à mortier, le récipient du malaxeur et les autres instruments en contact avec le mortier dans la salle d'essais.

Le malaxeur étant dans sa position de fonctionnement, verser le sable et ensuite le ciment dans le récipient du malaxeur ; homogénéiser le mélange de sable et de ciment pendant 30 s à petite vitesse ; verser l'eau, consigner le temps, et malaxer immédiatement à petite vitesse pendant 60 s ; régler le malaxeur sur la grande vitesse et malaxer à nouveau 60 s.

Note :

Afin d'éviter les déperditions thermiques, il est recommandé d'exécuter le malaxage dans un temps relativement court. C'est pour cette raison que le temps de malaxage prescrit dans l'EN 196-1 a été raccourci.

3 Mise en place de l'échantillon d'essai :

Aussitôt après le malaxage, peser $(1\ 575 \pm 1)$ g de mortier dans la boîte (voir 4.4) qui a été pesée au préalable, avec son couvercle, à $\pm 0,5$ g. Mettre en place le couvercle en s'assurant qu'il assure l'étanchéité. Remplir l'étui pour thermomètre de $(2,5 \pm 0,5)$ cm³ d'huile (par exemple de l'huile minérale fluide), afin d'améliorer le contact thermique entre l'échantillon d'essai et le thermomètre.

- Peser la boîte à mortier à $\pm 0,5$ g pour pouvoir contrôler, en fin d'essai, toute perte de vapeur d'eau éventuelle.
- Aussitôt après, l'introduire dans le calorimètre d'essai (voir 4.1) et le refermer immédiatement avec le bouchon.
- Mettre aussitôt le thermomètre en place dans l'étui pour thermomètre de manière à ce qu'il soit approximativement au cœur de l'échantillon d'essai.
- Sceller l'orifice de passage à travers le bouchon au moyen d'un dispositif de fermeture.

II-4-3-Essai sur mortier**II-4-3-1 Détermination de la résistance mécanique par compression et par flexion**

La résistance d'un mortier est directement dépendante du type de ciment, donc il s'agit de définir les qualités de résistance d'un ciment plutôt que d'un mortier.

Les résistances mécaniques des ciments sont déterminées par des essais sur mortier dit 'normale' à 28 jours d'âges en flexion et compression des éprouvettes 4 x 4 x 16 cm³.

La résistance du mortier est alors considérée comme significative de la résistance du ciment. Elle dépend de la classe du ciment et est exprimée en Méga Pascal (MPa).

Le mortier utilisé est réalisé conformément à la norme EN196-1. Le sable utilisé est un sable appelé 'sable normalisé CEN' selon la norme EN196-1'.

Appareillage

L'ensemble est décrit de manière détaillée par la norme EN196-1. Il est composé de :

- Armoire humide (chambre d'humidité) maintenue à une température de $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ et une humidité relative supérieure à 90%.
- Un malaxeur normalisé et une table à choc.
- Moules normalisés permettant de réaliser trois éprouvettes prismatiques de section carrée 4 x 4 cm² et de longueur 16 cm.



Figure II-10 Malaxeur semi-automatique de mortier **Figure II-11 Eprouvette prismatique (4x4x16) cm³**

(Laboratoire de Lafarge M'sila)

(Laboratoire de Lafarge M'sila)



Figure II-12 Table à choc (Laboratoire de Lafarge M'sila)

- Un appareil de choc (Figure. 12.) permettant d'appliquer 60 chocs aux moules en les faisant chuter d'une hauteur de $15 \pm 0,3$ millimètres à la fréquence d'une chute par seconde pendant 60 secondes.

- Une machine d'essais de la résistance à la flexion permettant d'appliquer des charges jusqu'à 10 KN avec une vitesse d'une mise en charge de 50 ± 10 N/S. La machine doit être équipée d'un dispositif de flexion.
- Une machine d'essais à la compression permettant d'appliquer des charges jusqu'à 150 KN avec une vitesse d'une mise en charge de 2400 ± 200 N/S. Cette machine est équipée d'un dispositif de compression.



**Figure.II-13 Machine de compression
(Laboratoire de Lafarge M'sila)**

Préparation du mortier

La composition du mortier à tester est la suivante :

- Sable normalisé : 1350 ± 5 g.
- Ciment : 450 ± 2 g.
- Eau de gâchage : 225 ± 1 g (le rapport eau/liant est de 0,5).

Mode opératoire :

La procédure opératoire est la suivante :

- Verser l'eau dans le récipient et introduire le ciment soigneusement.
- Mettre le malaxeur en marche à petite vitesse.
- Après 30 secondes, introduire le sable régulièrement pendant les 30 secondes qui suivent et continuer à malaxer pendant 30 secondes.
- Arrêter le malaxeur pendant une minute et 30 secondes. Enlever à l'aide d'une raclette en caoutchouc tout le mortier adhérent à la paroi et au fond vers le milieu de celui-ci.
- Reprendre ensuite le malaxage à grande vitesse pendant une minute.

Type de ciment	Composition des mortiers		
	Ciment (g)	L'eau (ml)	Sable normalisé (g)
CEM01 0%	450	225	1350
CEM02 10%	450	225	1350
CEM03 20%	450	225	1350
CEM04 30%	450	225	1350

Tableau.II-8 : Composition des mortiers.

Préparation des éprouvettes

La préparation des éprouvettes doit suivre le mode opératoire suivant :

- Le moule et sa hausse fermement fixés à la table de choc.
- Remplir avec précaution à l'aide d'une cuillère convenable, le moule à moitié et dans chaque compartiment de celui-ci.
- Etaler la couche uniformément en utilisant une spatule adéquate ; la tenir verticalement et avec des mouvements de vas et viens.
- Démarrer ensuite l'appareil de choc pour 60 coups.
- Introduire la seconde couche, niveler avec la spatule et démarrer l'appareil pour 60 autres coups.
- Retirer avec précaution le moule de la table, puis enlever immédiatement l'excès de mortier avec une règle métallique plate.
- Lisser la surface des éprouvettes en tenant la règle presque à plat.
- Etiqueter les moules pour identification.
- Placer sans tarder, les moules dans une armoire humide, pendant 24 h.
- Après 24 heures de cure, faire sortir les moules et procéder au démoulage des éprouvettes.
- Immerger sans tarder, les éprouvettes dans un bain d'eau de température $20 \pm 1^\circ\text{C}$.

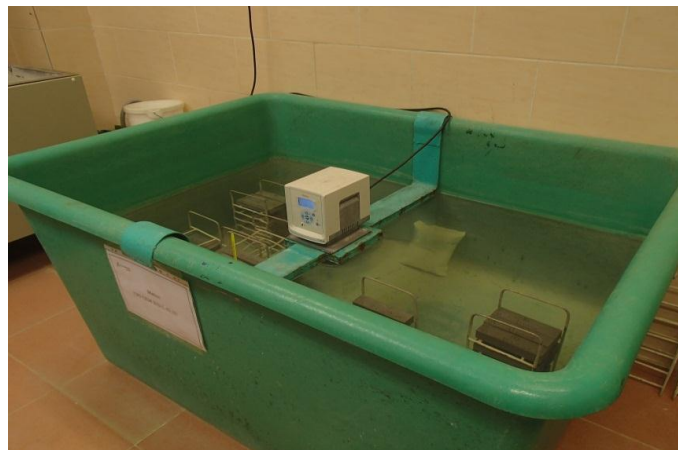


Figure.II-14 : Bain d'eau pour la conservation des éprouvettes.

II-4-3-2 Détermination du retrait et gonflement

Objectif de l'essai :

Il s'agit d'évaluer le retrait, ou le gonflement, que provoque le ciment étudié sur des éprouvettes de mortier normal.

Principe de l'essai :

On compare, à différents temps t , la variation de longueur d'une éprouvette $4 \times 4 \times 16$ cm, par rapport à sa longueur à un temps t_0 pris pour origine.

Mode opératoire :

Au moment de la mesure, le comparateur est mis au zéro sur la tige étalon en Invar de longueur $L = 160$ mm.

Soit $dl(t)$ la valeur lue sur le comparateur au temps t ; l'éprouvette a une longueur au temps considéré:

$$l = L + dl(t)$$

Soit $l(t_0)$ la longueur de l'éprouvette au temps t_0 choisi d'origine. En général, cette origine est prise au moment du démoulage, 24 h après la confection des éprouvettes. La variation de longueur au temps t sera:

$$\Delta l(t) = l(t) - l(t_0) = dl(t) - dl(t_0)$$

La variation relative de longueur est généralement désignée par ε et a pour expression:

$$\varepsilon(t) = \frac{\Delta l(t)}{L} = \frac{dl(t) - dl(t_0)}{L}$$

$\Delta l(t)$ est obtenu en faisant la moyenne sur les 3 éprouvettes issues du même moule. Lorsque les éprouvettes sont conservées dans l'air, $\Delta l(t)$ est généralement négatif et l'on parle alors de retrait de l'éprouvette. Lorsque l'éprouvette est conservée dans l'eau, $\Delta l(t)$ peut être positif: il y a alors gonflement.

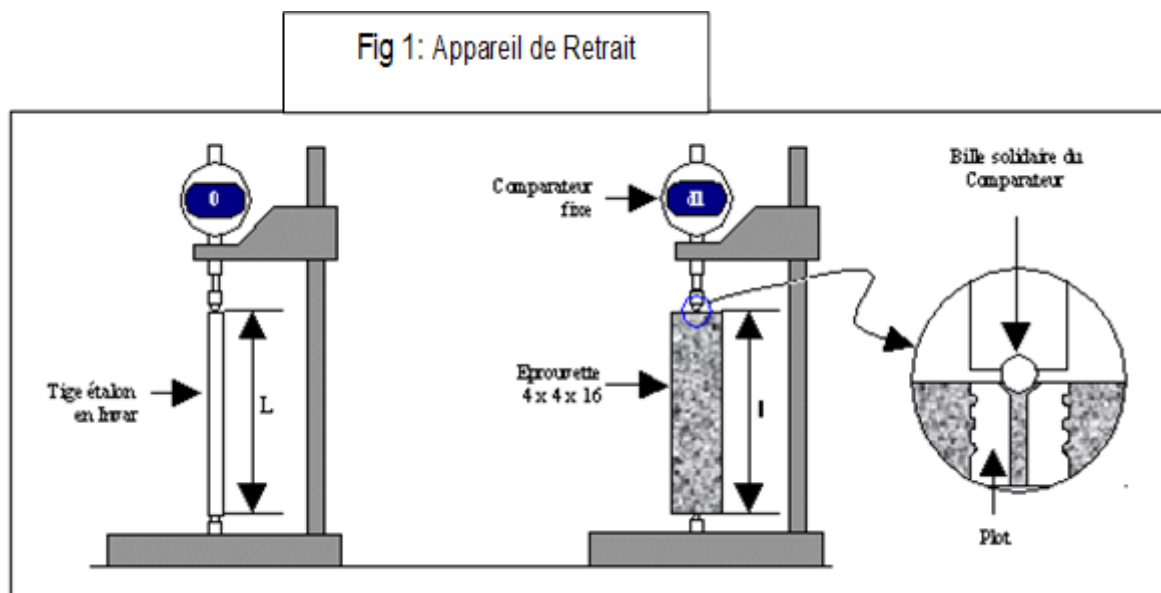


Figure.II-15 : Appareil de retrait et de gonflement.

Conclusion

Dans cette partie, nous avons commencé par la présentation de la différente méthode d'analyses (chimiques, physiques et mécaniques) utilisée pour l'identification de nos matériaux et pour avoir une idée précise sur la nature des différents matériaux rentrant dans la composition des mortiers.

Chapitre III :
Résultats
et
interprétation

Introduction

Le but de ce chapitre est de présenter les résultats des travaux expérimentaux qui ont été réalisés dans le cadre de notre projet de fin d'études et de donner des interprétations à ces résultats et les justifier. A la fin de ce chapitre nous tenterons de proposer une composition optimale du liant équivalent vis-à-vis de la résistance à la compression.

L'étude de l'influence de la pouzzolane de Béni Saf, est effectuée sur la poudre et la pâte de ciment avec la pouzzolane et aussi sur les éprouvettes de mortier (3éprouvette par moule). Les mortiers étudiés sont composé des mélanges de mortier contenant du ciment, sable, pouzzolane et de l'eau)

Cela nous a permis, grâce à des manipulations simples et rapides, de mettre en évidence la variation de la maniabilité du liant lors de la substitution progressive de cet ajout.

L'obtention de ces mélanges nous a permet d'étudier une séries d'essais physiques et mécanique qui sont : surface spécifique Blaine, la densité, la consistance normale, les temps des prise, l'expansion, chaleur d'hydratation, ainsi les résistances mécaniques (compression et flexion) gonflement et retrait.

III- Résultats et analyses

III-1 Essais sur ciment anhydre

III-1-1- Influence du taux de pouzzolane sur le poids spécifique du ciment :

Les résultats du tableau (III-1) et la figure (III-1) présentent l'effet de l'addition de la pouzzolane sur la densité du ciment.

	Pouzzolane (%)	Densité (t/m ³)
CEM 1	CPA 0%	3,17
CEM 2	10% Pouzzolane	3,15
CEM 3	20% Pouzzolane	3,08
CEM 4	30% Pouzzolane	3,05

Tableau.III-1 : Masse volumique de ciment.

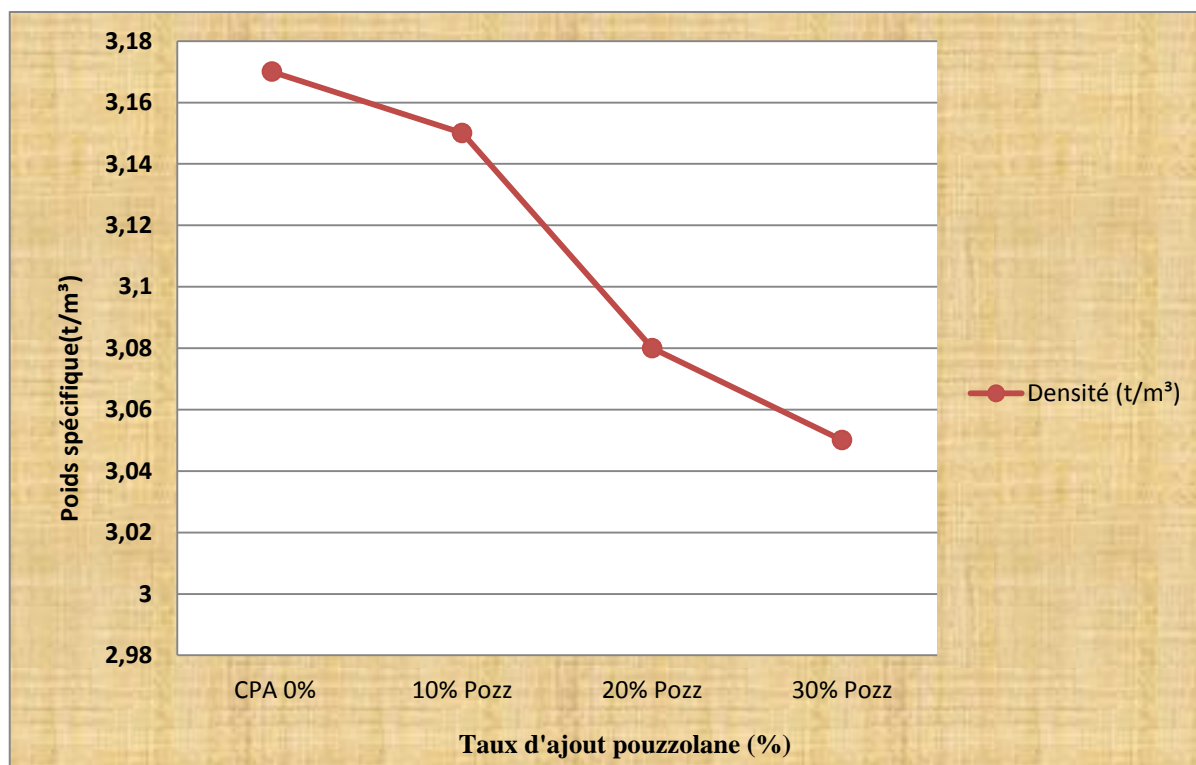


Figure.III-1 : Variation du poids spécifique de ciment en fonction de taux de pouzzolane.

D'après ces résultats on remarque une réduction du poids spécifique avec l'augmentation du pourcentage de la pouzzolane dans le ciment.

La masse spécifique dans la formulation de 10% pouzzolane est diminué d'une valeur de 0.63% et 2.84% dans le mélange de 20% pouzzolane et 3.78% dans la formulation de 30% pouzzolane par rapport au ciment témoin.

On note que l'augmentation de la quantité de la pouzzolane dans le ciment à un effet significatif sur le poids spécifique ou la densité de ciment car la pouzzolane à une grand volume.

III-1-2- Influence du taux d'ajout pouzzolane sur la surface spécifique du ciment :

Les résultats du tableau (III-2) et la figure (III-2) présentent l'effet de l'addition de la pouzzolane sur la surface spécifique du ciment.

	Pouzzolane (%)	SSB (g/cm ²)
CEM 1	CPA 0%	3850
CEM 2	10% Pouzzolane	4050
CEM 3	20% Pouzzolane	4200
CEM 4	30% Pouzzolane	4430

Tableau.III-2 : La Finesse de Blaine.

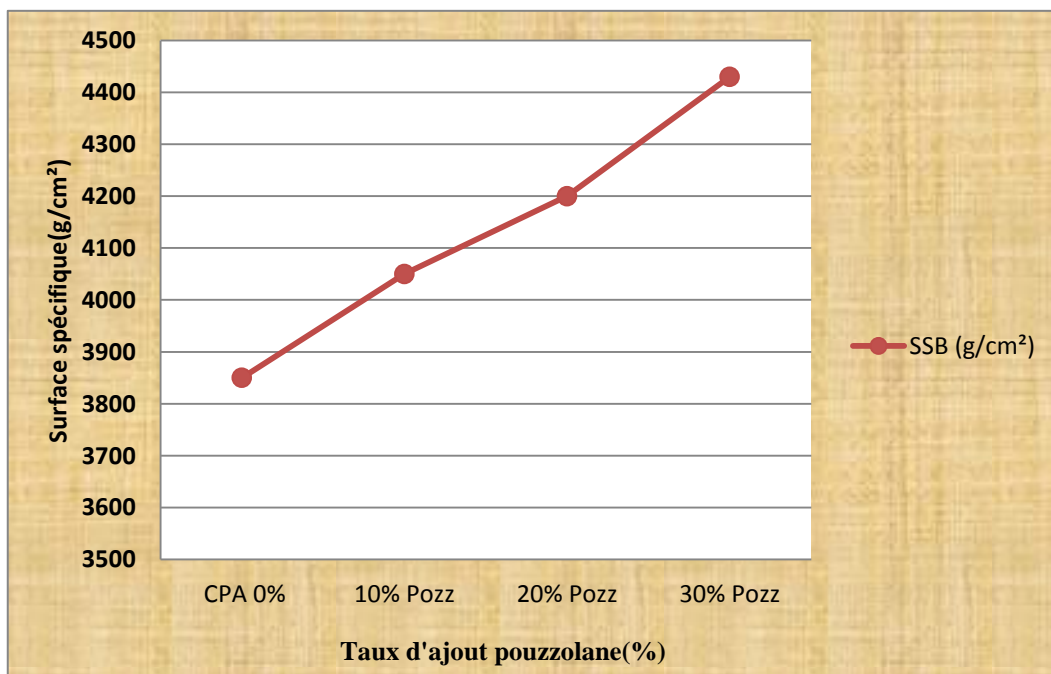


Figure.III-2 : Variation de la surface spécifique de ciment en fonction de taux d'ajout pouzzolane.

Dans cette figure nous remarquons une augmentation de la surface spécifique avec l'augmentation du pourcentage de la pouzzolane dans le ciment c'est –à-dire que les grains de la pouzzolane sont très fin.

La finesse du mélange varié entre 4050 et 4430 cm^2/g donc elle est élevée par apport au ciment témoin.

Selon les résultats obtenus, on note que dans la formulation avec 10% de pouzzolane la surface spécifique augmente d'une 5.19% et dans celle 20% de pouzzolane augmente de 9.1% et d'une 15.06% dans le mélange de 30% pouzzolane.

Donc en conclure que l'augmentation de la quantité de l'ajout pouzzolane incorporé dans le ciment à un effet significatif sur la surface spécifique (Blaine) de ciment.

III-1-3- Influence du taux d'ajout pouzzolane sur le refus:

Les résultats du tableau (III-3) et la figure (III-3) présente les propriétés physiques des ciments préparés (refus sur tamis 45 μm et 90 μm).

	Pouzzolane (%)	Refus 45μm	Refus 90μm
CEM 1	CPA 0%	12,2	1,2
CEM 2	10% Pouzzolane	9,1	0,7
CEM 3	20% Pouzzolane	8,4	0,8
CEM 4	30% Pouzzolane	8,1	0,7

Tableau.III-3 : Refus.

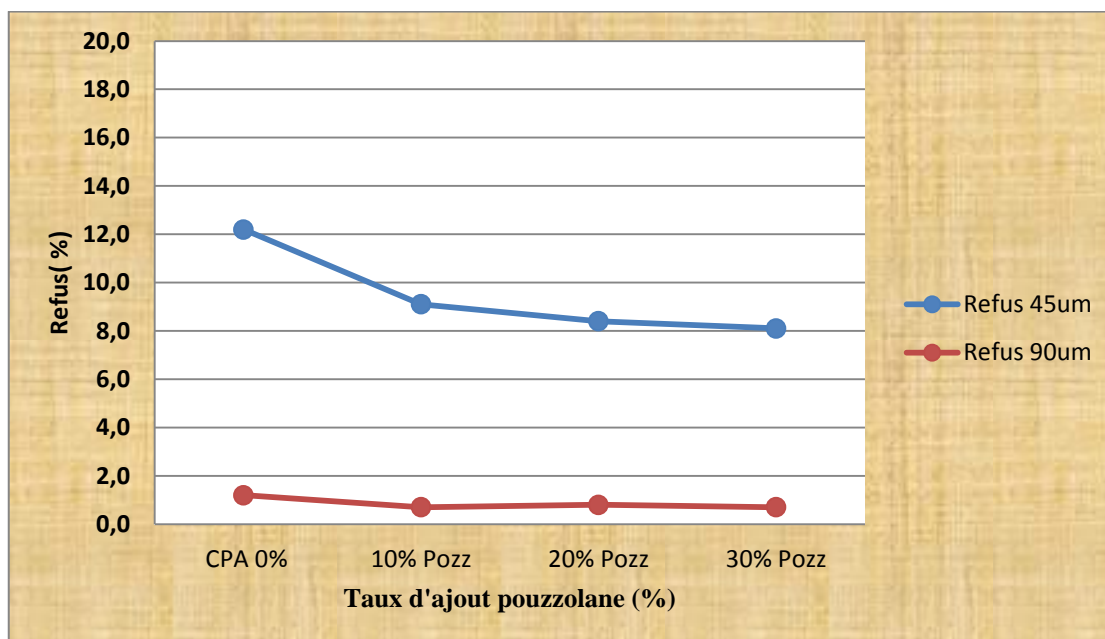


Figure.III-3 : Analyse granulométrique du ciment préparé (ALPINE).

Les résultats expérimentaux obtenus sur cette figure présentent l'effet du taux d'ajout (pouzzolane) sur l'analyse granulométrique à 45 µm et 90µm.

L'augmentation de taux d'ajout pouzzolane dans les ciments préparé diminue la granulométrie de ciment.

III-2-Essais sur ciment hydraté

III-1-1- Influence du taux de pouzzolane sur la consistance normale :

Les résultats du tableau (III-4) et la figure (III-4) présentent l'effet de l'addition de la pouzzolane sur la consistance normale.

	Pouzzolane (%)	E/C (%)
CEM 1	CPA 0%	26,8
CEM 2	10% Pouzzolane	27,5
CEM 3	20% Pouzzolane	28
CEM 4	30% Pouzzolane	28,5

Tableau.III-4 : La consistance.

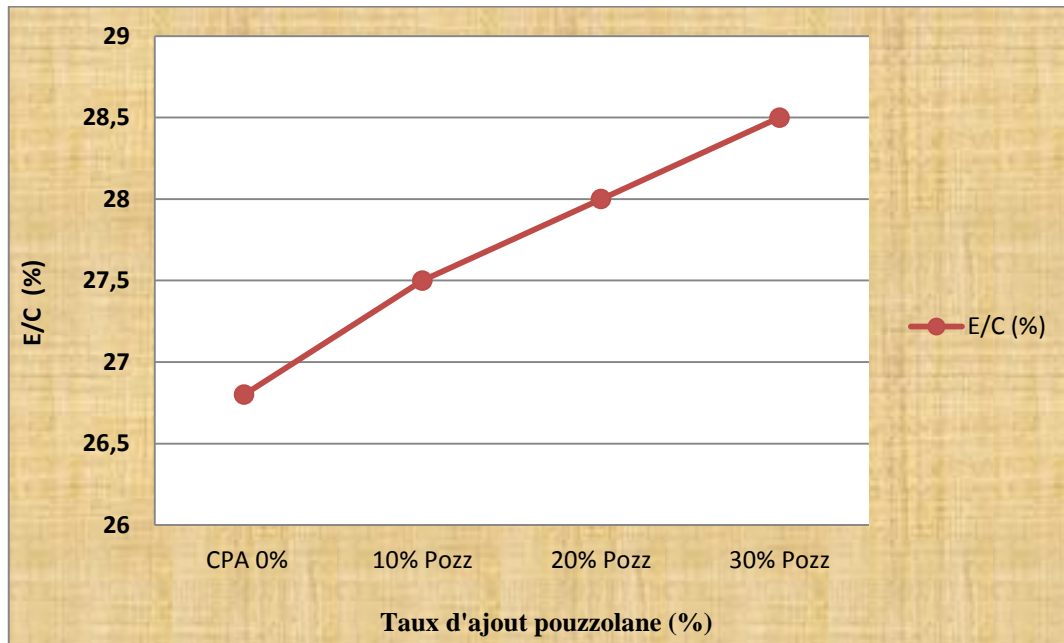


Figure. III-4 : Variation du Rapport E/C (Consistance normale) en fonction du taux de pouzzolane.

Nous remarquons dans cette figure que pour garder une maniabilité constante des différents mélanges, il faut augmenter la quantité d'eau de gâchage au fur et à mesure que la teneur de l'ajout (pouzzolane) augmente.

La comparaison de la maniabilité des pâtes de contrôle (sans ajouts de pouzzolane), avec les pâtes contenant de la pouzzolane a conduit à constater la nécessité d'augmenter la quantité d'eau.

Selon les résultats obtenus nous pouvons conclure que les mélanges contenant l'ajout (pouzzolane) 10% , 20% et 30% nécessitent une augmentation de 0.7% 1.2% 1.7% de la quantité d'eau pour obtenir une pâte normale par rapport à la pâte témoin.

III-1-2- Influence du Taux de pouzzolane sur le Temps de Prise :

Les résultats du tableau (III-5) et la figure (III-5) présentent l'évolution de ces temps mesurés en minutes (début et fin de prise) pour les différentes compositions des mélanges.

	Pouzzolane (%)	DP (min)	FP (min)
CEM 1	CPA 0%	140	200
CEM 2	10% Pouzzolane	160	230
CEM 3	20% Pouzzolane	165	235
CEM 4	30% Pouzzolane	170	240

Tableau.III-5 : Temps de prise.

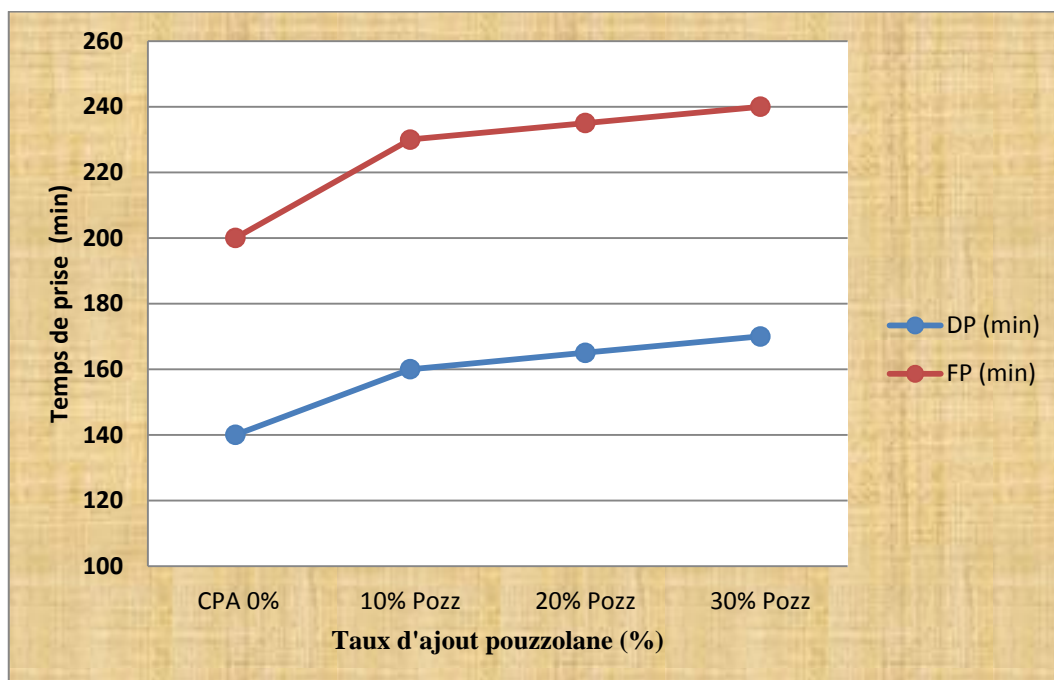


Figure. III-5 : Variation des Temps de prises en fonction de taux de pouzzolane.

Pour la même maniabilité des pâtes des liants élaborés, des temps de prises sont mesurés (début et de fin de prise) conformes aux normes NF 196-3

Les mélanges contenant de la pouzzolane présentent des augmentations dans les temps de début et fin de prise supérieures par rapport à la pâte témoin.

Pour le début de prise nous remarquons que les pâtes à base de 10%, 20% et 30 % de pouzzolane présente une augmentation de 14.28%, 17.85% et 21.42% respectivement par rapport aux pâtes de contrôle.

Pour la fin de prise nous remarquons que les pâtes à base de 10%, 20% et 30 % de pouzzolane présente une augmentation de 15%, 17.5% et 20% respectivement par rapport aux pâtes de contrôle.

L'étude a aussi confirmé qu'au jeune âge, la prise est plus rapide pour la pâte de contrôle que pour les pâtes à base de l'ajout (pouzzolane) car l'influence de la pouzzolane a eu pour effet de retardé l'hydratation du ciment. Nous notons un retard minimal d'une heure.

III-1-3- Influence du taux d'ajout pouzzolane sur la stabilité du ciment :

Les résultats du tableau (III-6) et la figure (III-6) présentent l'effet de l'addition de la pouzzolane sur la stabilité du ciment.

	Pouzzolane (%)	Expansion (mm)
CEM 1	CPA 0%	1
CEM 2	10% Pouzzolane	1,5
CEM 3	20% Pouzzolane	2
CEM 4	30% Pouzzolane	2

Tableau.III-6 : Expansion.

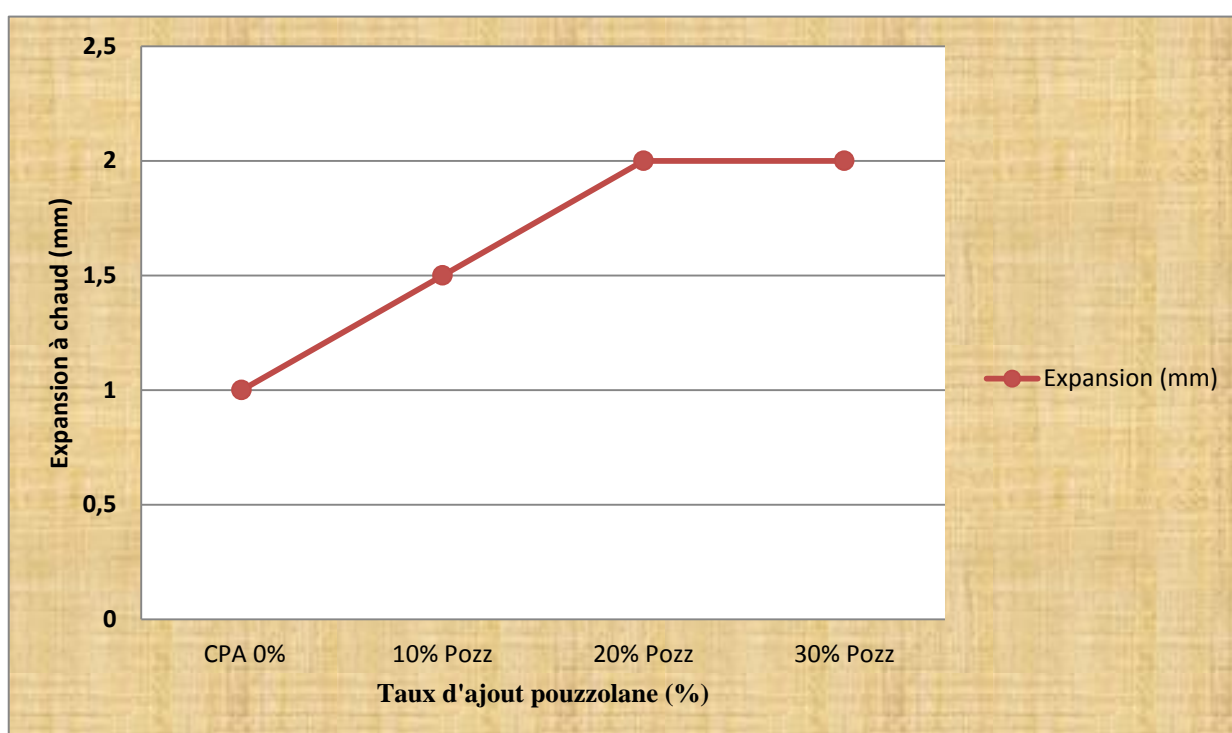


Figure.III-6 :Variation de l'expansion en fonction de taux de pouzzolane.

Les résultats de cette figure indiquent que l'expansion à chaud (hydratation accélérée par traitement thermique à 100°C) augmente avec l'augmentation du taux de pouzzolane d'une façon relativement linéaire. Donc les pâtes de 10 %, 20% et 30% de pouzzolane augmentent de 50% à 100% par rapport à la pâte témoin. Par contre, entre 20% et 30%, il y a une stabilité.

Cette augmentation de l'expansion peut être expliquée par la présence d'impuretés ainsi que d'autres éléments tels que le MgO qui sont préjudiciables au ciment et qui donnent généralement une expansion élevée.

III-1-4- Influence du taux de pouzzolane sur la chaleur d'hydratation :

Les résultats expérimentaux du tableau (III-7) et la figure (III-7) présentent l'effet du taux de pouzzolane sur la chaleur d'hydratation (le dégagement de chaleur de mortier) des échantillons de mortier normalise.

	Pouzzolane (%)	Chaleur D'hydratation (j/g)
CEM 1	CPA 0%	296
CEM 2	10% Pouzzolane	286
CEM 3	20% Pouzzolane	280
CEM 4	30% Pouzzolane	276

Tableau.III-7 : chaleur d'hydratation.

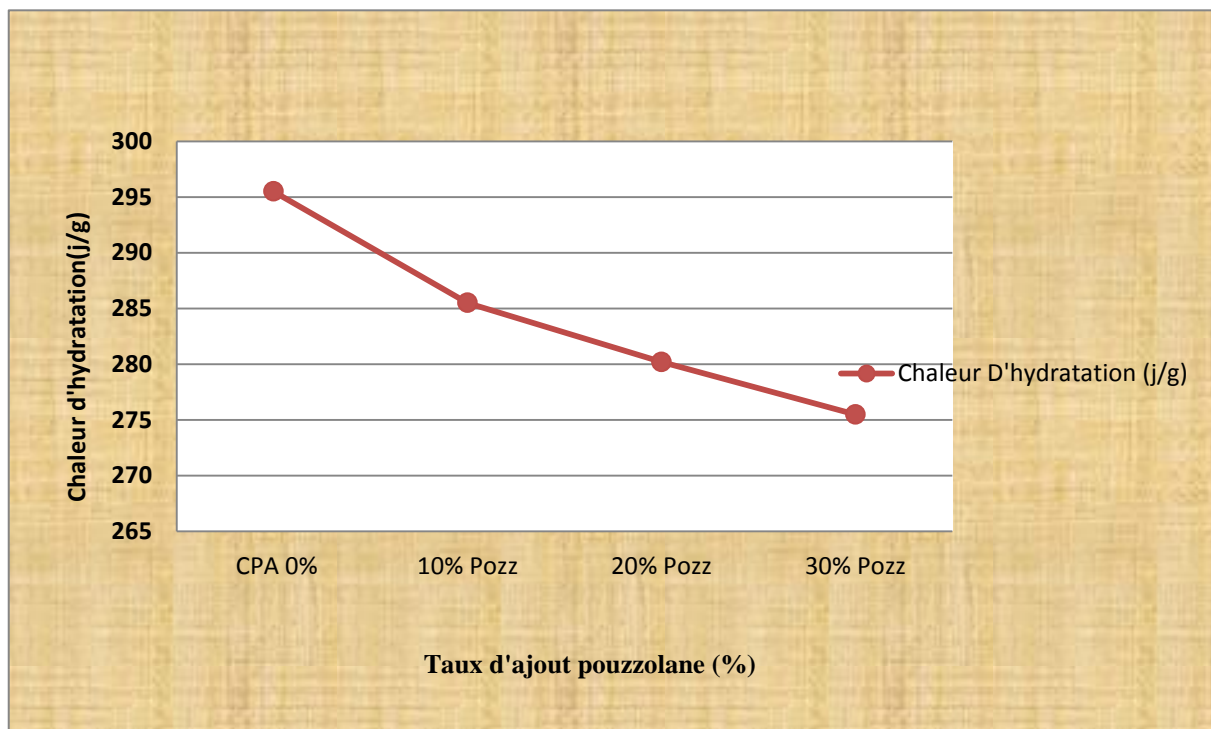


Figure.III-7 : Variation de la chaleur d'hydratation en fonction de taux de pouzzolane.

D'après ces résultats on note que l'augmentation du pourcentage de pouzzolane incorporé dans le ciment diminue le dégagement de chaleur d'hydratation avec l'augmentation de temps de prise.

Le phénomène de prise du ciment s'accompagne d'une réaction exothermique dont l'importance dépend de différents paramètres, en particulier :

- la nature et le taux de pouzzolane utilisé dans le ciment.
- la nature minéralogique du clinker : plus les teneurs en aluminat tricalcique (C_3A) et silicate tricalcique (C_3S) sont élevées, plus la chaleur d'hydratation est forte.
- la température extérieure.

La chaleur d'hydratation des ciments à faible chaleur d'hydratation ne doit pas dépasser la valeur caractéristique de 270 j/g selon la Norme NA 442 donc les ciments du taux d'ajout pouzzolane (0%, 10% ,20% ,30%) c'est un ciment à faible chaleur d'hydratation.

III-3 Essais sur mortiers

III-3-1 Influence du Taux de pouzzolane sur la résistance à la compression

Les résultats expérimentaux du tableau (III-8) et la figure (III-8) présentent l'effet du taux de pouzzolane sur la résistance à la compression.

	Pouzzolane(%)	Rc02j(MPa)	Rc07j (MPa)	Rc28j (MPa)	Rc 60j (MPa)
CEM 1	CPA 0%	27,50	44,40	58,80	61,40
CEM 2	10% Pouzzolane	22,30	38,70	47,80	50,20
CEM 3	20% Pouzzolane	21,10	38,40	44,10	47,40
CEM 4	30% Pouzzolane	20,10	37,90	43,30	46,90

Tableau.III-8 : Résistance à la compression.

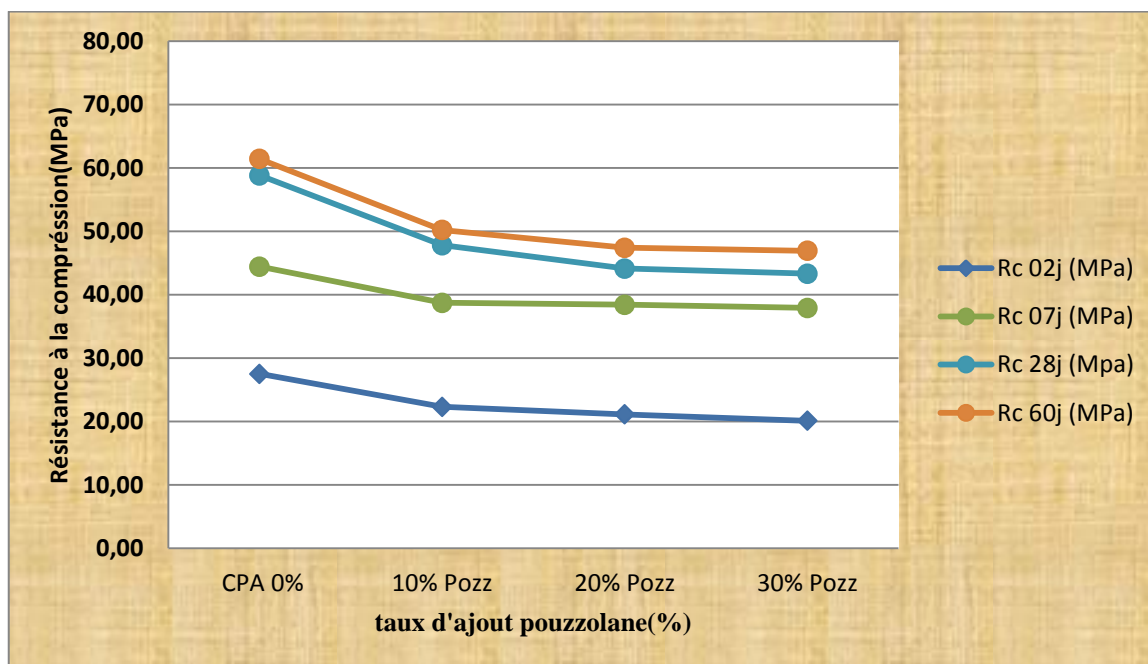


Figure.III-8 : Variation de la résistance mécanique à la compression en fonction du taux de pouzzolane.

D'après cette figure on remarque que les mortiers qui contiennent de la pouzzolane développent des résistances qui restent toujours inférieures à celle du mortier de contrôle et cela à tous les âges.

La résistance à la compression diminue considérablement avec l'augmentation du pourcentage d'ajout au jeune âge. A titre d'exemple, un remplacement du ciment par 30% de pouzzolane diminue la résistance à la compression de 26.9%, 14.63%, 26.36% à 2j, 7j et 28 jours respectivement.

Cette diminution de la résistance est attribuée principalement à l'activité lente de la pouzzolane.

Ce phénomène s'explique par l'interaction entre la silice réactive qui se situe dans la partie vitreuse de la pouzzolane et le $\text{Ca}(\text{OH})_2$ libéré par l'hydratation du CPA ce qui donne à la pouzzolane la propriété de fixer la chaux. La réaction pouzzolanique n'est pas prédominante au jeune âge, ceci mène à une hydratation moins intense aux jeunes âges en induisant de faibles résistances (effet de retardateur de prise).

III-3-2 Influence du taux de pouzzolane sur la résistance à la flexion

Les résultats du tableau (III-9) et la figure (III-9) présentent l'effet du taux de pouzzolane sur la résistance à la flexion

	Rf 2j	Rf 7j	Rf 28j	Rf 60j
CPA 0%	4,6	6,7	8,7	8,9
10%pouzzolane	4,3	5,7	7,1	7,5
20%pouzzolane	4	5,2	6,7	7
30%pouzzolane	3,2	4,3	6,1	6,5

Tableau.III-9 : Résistance à la flexion.

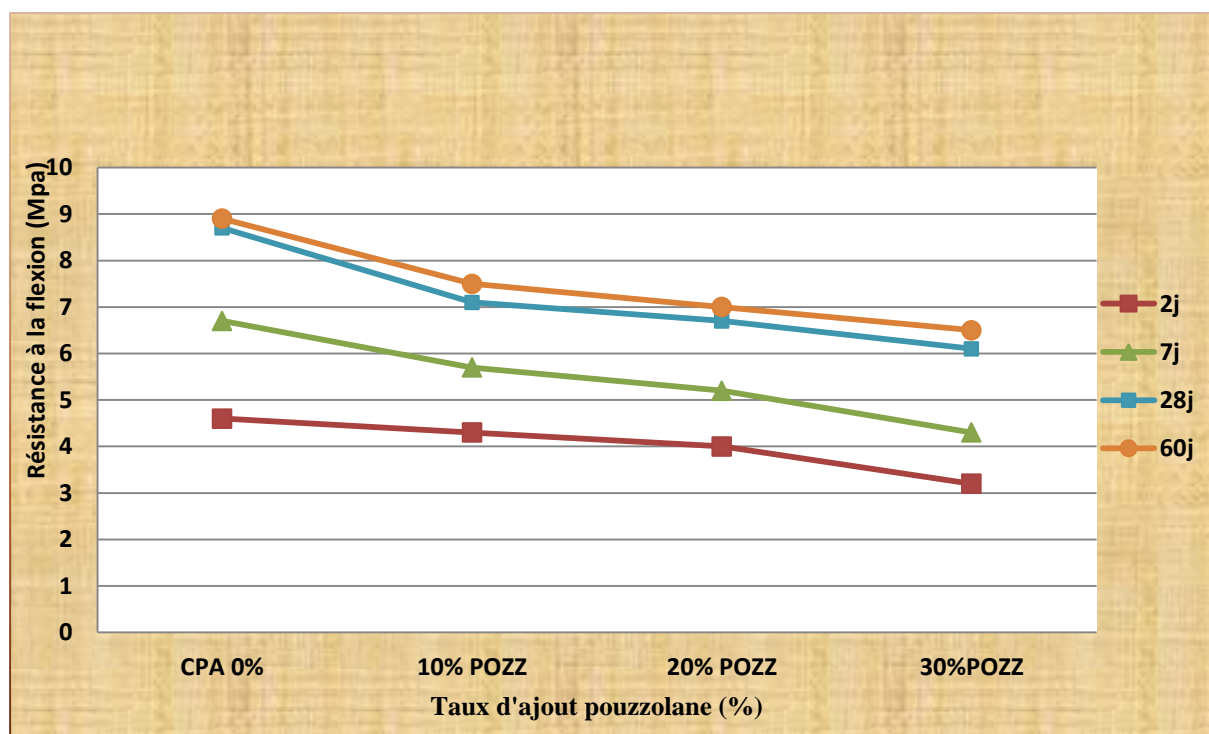


Figure.III-9 : Variation de flexion en fonction de taux de pouzzolane.

La figure présente l'effet de la pouzzolane sur la résistance à la flexion des mortiers aux différents âges : 2, 7, 28 et 60 jours. On observe des réductions systématiques des résistances des mortiers aux âges 2 et 7 jours au fur et à mesure que le pourcentage de la pouzzolane augmente.

Effectivement, cette réduction de résistance passe de 6.5%, 13.04%, 30.43% par rapport au mortier contrôle à l'âge de 2 jours, de 14.92 %, 22.38 %, 35.82% à l'âge de 7 jours si la

substitution en pouzzolane augmente de 10%, 20% et 30 %. A l'âge de 28 jours passe de 18%, 22%, 29.88%.

Le taux de réduction de résistance des mortiers avec ajout pouzzolane par rapport au mortier contrôle tend à décroître à long terme d'une façon considérable car il passe de (30.43 % à 6.5 %), de (35.82 % à 14.92%), de (29.88 % à 18%) pour les âges allant de 2 à 28 jours et cela pour les substitutions de 10%, 20% et 30% respectivement. Cela est dû à l'activité pouzzolanique de l'ajout qui est faible au jeune âge (2 et 7 jours) et tend à s'accroître à long terme (28 et 60 jours).

III-3-3- Influence du taux de pouzzolane sur le retrait

Les résultats expérimentaux obtenus du tableau (III-10) et la figure (III-10) présentent l'effet du taux de pouzzolane sur le retrait :

	Pouzzolane(%)	Retrait 03j (um/m)	Retrait 07j (um/m)	Retrait 28j (um/m)
CEM 1	CPA 0%	86,5	200,2	565,5
CEM 2	10% Pouzzolane	92,2	212,2	572,2
CEM 3	20% Pouzzolane	96,5	215,5	577,5
CEM 4	30% Pouzzolane	101,2	222,2	582,5

Tableau.III-10: Retrait.

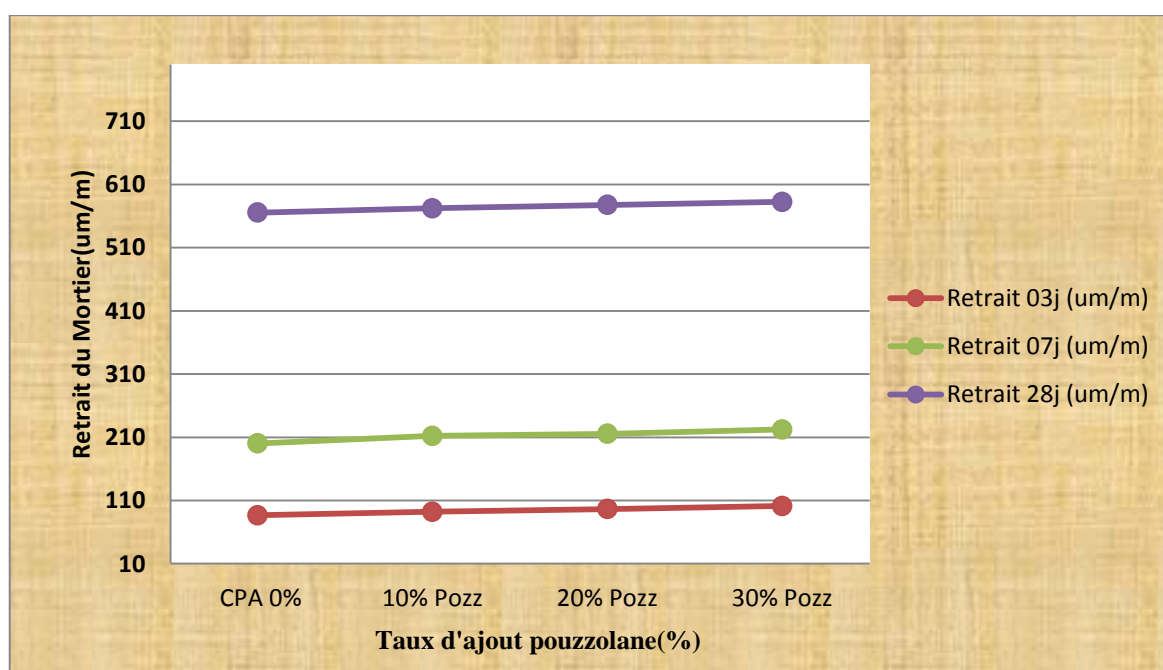


Figure.III-10 :Variation de retrait en fonction de taux de pouzzolane.

D'après cette figure en remarque que l'augmentation du pourcentage de pouzzolane augment le retrait.

Les principales remarques relatives au retrait observé pour les différents ciments étudiés sont :

- Le retrait augmente avec l'âge du mortier, ceci est dû à l'hydratation du ciment qui génère un fin réseau des pores capillaires des amas d'hydrates formés et à la dessiccation.
- Les retraits des ciments avec ajouts de laitier sont supérieurs à ceux du ciment témoin (sans ajout).

Ceci peut s'expliquer par la diminution du nombre et du diamètre des pores de la pâte du ciment hydraté, ainsi qu'à la formation d'un C-S-H secondaire.

On remarque aussi que la vitesse de retrait est lente jusqu'a 7 jours et rapide entre l'âge de 7 à 28 jours.

Cette cinétique de retrait est due à l'hydratation tardive de l'ajout pouzzolane.

III-3-4 Influence du taux de pouzzolane sur le gonflement :

Les résultats expérimentaux obtenus du tableau (III-11) et la figure (III-11) présentent l'effet du taux de pouzzolane sur le gonflement :

	Pouzzolane (%)	Gonflement 03j (um/m)	Gonflement 07j (um/m)	Gonflement 28j (um/m)
CEM 1	CPA 0%	22,2	42,2	79,5
CEM 2	10% Pouzzolane	29,5	45,5	86,6
CEM 3	20% Pouzzolane	32,5	47,8	90,2
CEM 4	30% Pouzzolane	45,5	63,5	102,2

Tableau.III-11 : Gonflement.

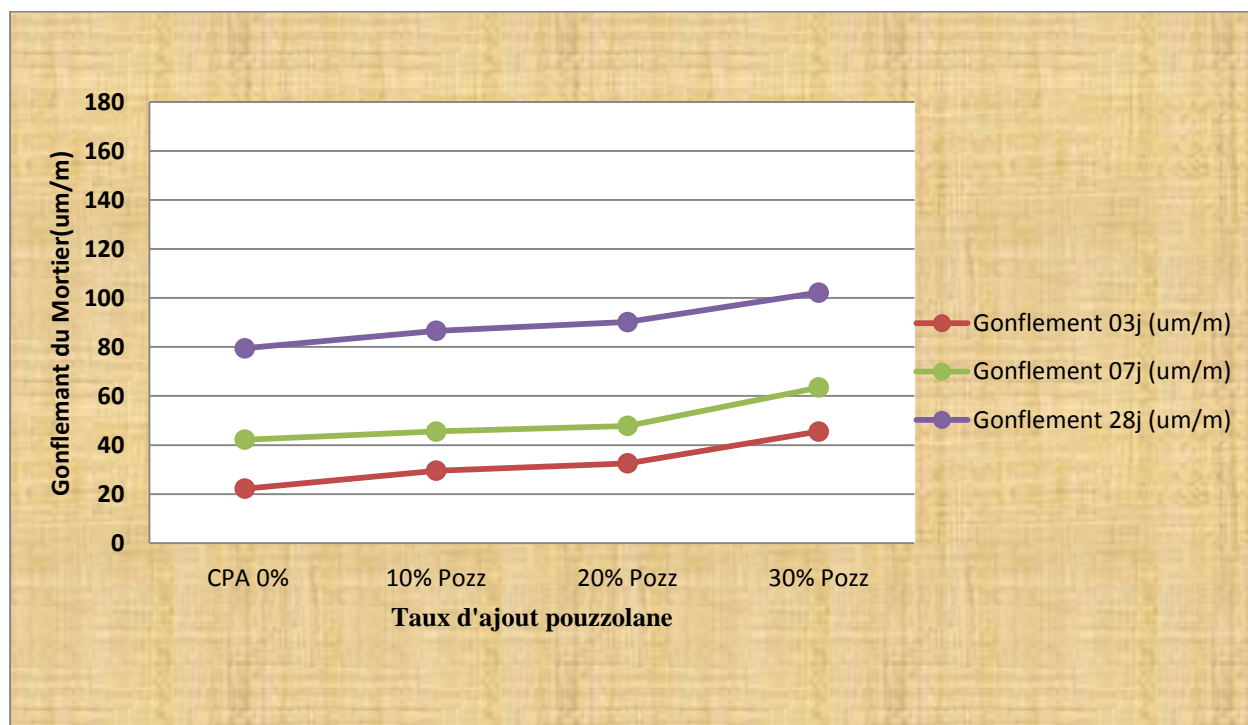


Figure.III-11-Variation de gonflement en fonction de taux de pouzzolane.

Le gonflement observé sur les éprouvettes contenant de pouzzolane est supérieur au gonflement dû au ciment témoin, ceci est dû à la consommation de la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et à la combinaison de l'oxyde de magnésium et à l'épuisement de la chaux libre pendant les réactions d'hydratation avec l'ajout incorporé dans le ciment à lent terme (formation du deuxième (C-S-H) cette figure illustre la variation des déformations du gonflement des ciments; on remarque que la vitesse de gonflement est relativement linéaire entre 3 et 28 jours.

III-4-La Relation entre la surface spécifique et les analyses granulométriques :

Les résultats expérimentaux obtenus du tableau (III-12) et la figure (III-12) présentent La Relation entre la surface spécifique et les analyses granulométriques.

	Pouzzolane (%)	Refus 45um	SSB (g/cm^2)
CEM 1	CPA 0%	12,2	3850
CEM 2	10% Pouzzolane	9,1	4050
CEM 3	20% Pouzzolane	8,4	4200
CEM 4	30% Pouzzolane	8,1	4430

Tableau.III-12 : Refus en fonction de la surface spécifique.

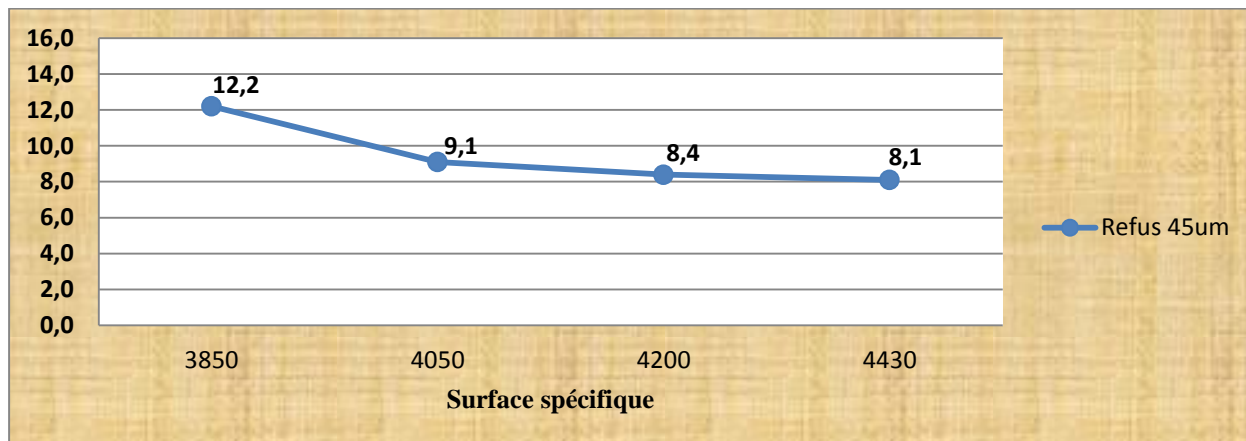


Figure.III-12 : Effet de surface spécifique sur l'analyse granulométrique de ciment (ALPINE).

Selon la figure, on note que la relation de surface spécifique et l'analyse granulométrique est une relation inverse avec l'augmentation du taux d'ajout pouzzolane.

L'augmentation du taux d'ajout pouzzolane augmente la surface spécifique et diminue la granulométrie de ciment.

III-5-Effet de la chaleur d'hydratation sur le temps de prise :

Les résultats expérimentaux obtenus du tableau (III-13) et la figure (III-13) présentent effet de la chaleur d'hydratation sur le temps de prise.

	Pouzzolane (%)	Chaleur D'hydratation (j/g)	début de prise (min)
CEM 1	CPA 0%	296	140
CEM 2	10% Pouzzolane	286	160
CEM 3	20% Pouzzolane	280	165
CEM 4	30% Pouzzolane	276	170

Tableau.III-13 : Début de prise Vs chaleur d'hydratation

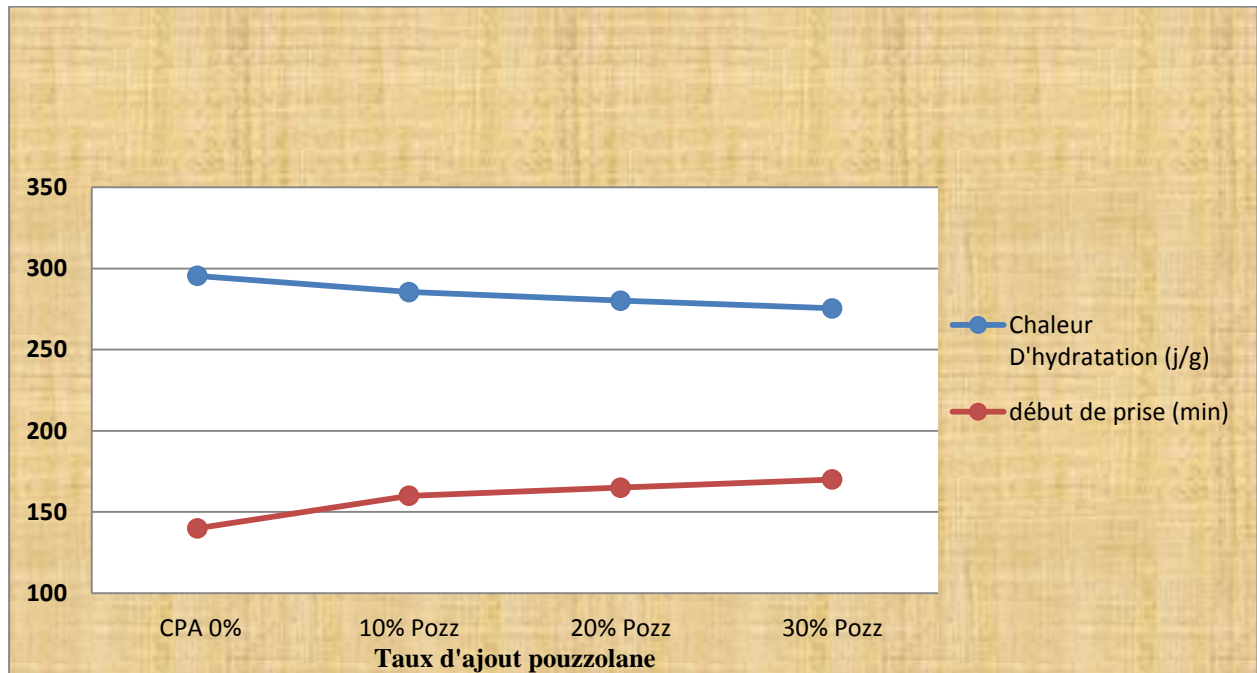


Figure.III-13 : Effet chaleur d'hydratation en fonction du temps de prise

On remarque que la chaleur d'hydratation diminue par rapport à l'augmentation du taux d'ajout pouzzolane et le temps de prise augment.

Conclusions

Ce travail a porté essentiellement sur l'étude de l'influence du remplacement du ciment par la pouzzolane de Béni-Saf sur l'évolution des caractéristiques de ciment et les résistances mécaniques des mortiers.

Les résultats de cette étude nous montrent que :

- L'addition de la pouzzolane au ciment portland entraîne un accroissement du temps de prise attribuable en partie à l'effet de dilution et en partie à l'augmentation de la teneur en eau nécessaire pour préparer la pâte de ciment.
- L'introduction de la pouzzolane conduit au développement des résistances mécaniques faibles aux jeunes âges. Cette diminution dans les résistances mécaniques est expliquée par la réaction pouzzolanique qui est ralentie au début de la réaction d'hydratation du ciment. Au moyen terme ces résistances commencent à développer des résistances assez importantes à cause du déclenchement de la réaction pouzzolanique retardé. Ces résistances atteignent ou dépassent à long terme les résistances des mortiers de contrôle.
- L'utilisation de la pouzzolane dans le ciment entraîne une augmentation de la surface spécifique Blaine en diminuant ainsi la porosité du mélange sec.
- L'essai de prise effectué sur pâte pure et sur pâte de liant a confirmé un retard de prise conséquence de la floculation des grains. Aux très jeunes âges, cet effet se limite essentiellement à une décélération du processus d'hydratation.

Nous avons constaté que la substitution de cet ajout (pouzzolane) entraîne une conservation et un maintien des performances mécaniques. La substitution qui présente un intérêt économique, réduit la quantité de ciment et occasionne un gain de résistance.

Conclusion Général

L'objectif de cette recherche a été de donner une étude sur l'évolution de l'effet de l'activité de la pouzzolane de Béni Saf.

Les conclusions les plus importantes peuvent être notées comme suivant :

- Pour garder une maniabilité constante, il faut augmenter la quantité d'eau de gâchage au fur et à mesure que la teneur en ajouts pouzzolane augmente.
- Les mortiers pouzzolaniques développent des résistances inférieures à celles du mortier de contrôle. La résistance à la flexion des mélanges contenant de la pouzzolane diminue avec l'augmentation du pourcentage d'ajout au jeune âge.
- Bien que la résistance à la compression au jeune âge des mortiers soit réduite par l'incorporation de la pouzzolane naturelle, cette dernière s'améliore en fonction du temps et atteint son optimum à long terme. L'incorporation d'un taux de pouzzolane naturelle au CPA s'avère efficace puisque la résistance du mortier devient comparable à celle du mortier témoin.
- Le remplacement d'une partie du ciment par la pouzzolane conduit à une augmentation des résistances entre 14 jours et 28 jours.
- Les mortiers ternaires élaborés avec l'ajout : pouzzolane présente des résistances comparables à celle du mortier de référence à court et à long terme.

- [1] : www.controls-group.com/...php/url...62.../nomefile=6265_francia.
- [2] : [Taylor, 1997] .Cementchemistry.Telford,NewYork.
- [3] : **Nicolas HYVERT** : Application de l'approche probabiliste à la durabilité des produits préfabriqués en béton (Thèse de doctorat -l'Université Toulouse III - Paul Sabatier-2009).
- [4] : kennouche.e-monsite.com/medias/.../cours-les-liants-hydrauliques-1.
- [5] : **www.ciment.com**
- [6] : **BERRAIH MIMOUN** : Etude des mortiers contenant de la pouzzolane naturelle et des déchets de verre (Mémoire de Magister- l'ENSET d'Oran-2010).
- [7] : (CNAT) les ciments rapport technique
- [8] : Réunion d'ingénieur , matériaux de construction , **Edition Eyrolles 1979**
- [9] : www.groupglobalcompany.com/ggf/tipos-a.../production-de-ciment
- [10] : **CHIHAOUI Ramdane** : Durabilité des matériaux cimentaires vis-à-vis d'un environnement chimiquement agressif (Mémoire de Magister- USTMB d'Oran -2008).
- [11] : **H. Rumpf, Aufber. Techn., 1973. 2: p. 59-71.**
- [12] : **A. A. Griffith**, The Phenomena of Rupture and Flow in Solids. **Phil. Trans. Roy. Soc, 1921. 163-198.**
- [13] : **H. Dombrowe, B. Hoffman, and W. Scheibe**, Mode of action and possibilities for use of grinding aids. ZKG International, 1982. 35(11): p. 571-580.
- [14] : **P. Blazy, J. Yvon, and E. A. Jdid, Fragmentation** : Généralité, Théorie. Techniques de l'ingénieur, 1992. A5050.
- [15] : **H.F.W. Taylor**, Cement chemistry. **Thomas Telford publishing, 1998.**
- [16] : Ciments Français, La fabrication des ciments. **Eyrolles, 1993.**
- [17] : **C. Guerandel, E. Moudilou, and S. Tusseau-Nenez and M. N. De Noirfontaine**, Modélisation thermodynamique du diagramme de phases du système CaO-SiO₂-Al₂O₃. rapport de fin d'étude ESIREM/CTG-Italcementi Group, 2006.
- [18] : **Yassine SENHADJI** : L'influence de la nature du ciment sur le comportement des mortiers vis-à-vis des attaques chimiques (acides et sulfatiques) (Mémoire de Magister-USTMB d'Oran -2006).
- [19] : **NORME ALGERIENNE** : « Liants hydrauliques - ciments courants : composition, spécifications et critères de conformité », NA 442 : 2000, Deuxième Edditions, **IANOR**
- [20] : **I. Odler**, hydratation, Setting, and Hardening of Portland Cement. Lea's Chemistry of Cement and Concrete, 1998.
- [21] : **Article Internet** « les ciments » 2004.
- [22] : Ciments Français, La fabrication des ciments. **Eyrolles, 1993.**
- [23] : **E. Moudilou**, Cinétiques et mécanismes de relargage des métaux lourds présent en traces dans les matrices cimentaires. Thèse Université d'Orleans, 2000.Pozz
- [24] : L'activité pouzzolanique, Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n° 93, 1978, pp. 66-69
- [25] : Chemistry of pozzolanic additions and mixed cements, in 6th International Congress on the Chemistry of Cement, **Mocow, September 1974**
- [26] : **A.MEBROUKI** «influence de la pouzzolane de Beni-Saf sur les caractéristiques mécaniques des mortiers » **thèse de Magister- Université Mostaganem - juin 2003.**

[27] : La pratique des ciments mortier et bétons « caractéristiques des liants des bétons mise en oeuvre des coulis et mortiers » (chapitre 1) **Michel Vénuat 1989.**

[28] : **Publication Internet** « mailto:philippe.montel@auvergne_volcan.com » 2004.

[29] : **J.M.GEOFFRAY, R.VALLADEAU** : Morphologie et couleur des pouzzolanes. Bulletin de liaison des Laboratoires de ponts et chaussées-92-nov-déc, 1977- réf. 2116. pp91-94.

[30] : **R.SERSALE** : Structure et caractérisation des pouzzolanes et des cendres volantes. Sous thème IV-1.7eme Congrès International de la chimie des ciments. **Vol I. Paris, 1980.**

[31] : **Kaid Nouria 2002.**

[32] : Publication du 01-01-1974 de l'institut de recherche de la construction « CBD-140-F. Comportement thermique des murs de maçonnerie en béton sous l'action du feu » **de T. Z. HARMATHY et L. W. ALLEN** date de publication **01-01-1974.**