

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique

Université Akli Mohand Oulhadj - Bouira -
Institut de Technologie



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة أكلي محمد أولحاج
- البويرة -
معهد التكنولوجيا

Département de Technologie chimique industrielle

Rapport de soutenance

En vue de l'obtention du diplôme de

Licence professionnalisant en :

Génie chimique

Thème :

**Influence du taux d'ajout de pouzzolane sur les
caractéristiques physico-chimiques et mécaniques des
ciments**

Réalisé par :

HAMDY Belkacem

Encadré par :

BELKACEMI Samir

M.A.A

Tuteur de l'entreprise :

Mme Fouzia MAAMERI

Cimenterie SEG

Année Universitaire : 2018/2019

Remerciements

Nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir accordé la santé et le courage pour arriver au terme de ce travail. Je remercie sincèrement ceux qui ont, de près ou de loin contribué à la réalisation de ce mémoire, fruit de mon premier pas dans l'univers de la recherche.

Je commencerai par remercier Mr: Belkacemi samir qui m'a orienté et m'a conseillé.

Je remercie également le président et les membres de jury d'avoir accepté de juger ce travail.

Mes remerciements vont également à toute l'équipe du laboratoire d'analyse au niveau de l'entreprise de la cimenterie de Sour-El-Ghozlane.

Je tiens à remercier profondément et très chaleureusement les deux personnes les plus chères à mon cœur, mes parents, pour leur soutien et encouragement durant tout mon cursus.

Je remercie également toute ma famille, tous mes amis et toute ma promo.

DEDICACES

Je dédie ce mémoire à mes chers parents qui m'ont toujours poussé et motivé dans mes études, Sans eux je n'aurai certainement pas fait cela.

À chaque personne qui m'a aidée et encouragée par ses conseils et m'a offert tout pour la réussite

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I: Synthèse bibliographique.	
I.1. Présentation de l'entreprise	2
I.1.1. Historique.....	2
I.1.2. Implantation géographique	2
I.1.3. Description de l'usine	2
I.1.4. Les grands projets réalisés avec les produits de la cimenterie	3
I.1.5. Organigramme de la filiale	4
I.2. Le ciment	5
I.2.1. Définition du ciment	5
I.2.2. Matières premières	5
I.2.3. Processus de fabrication du ciment	6
I.2.3.1. Extraction et préparation des matières premières	6
I.2.3.2. Le séchage et le broyage	7
I.2.3.3. Cuisson de la farine et stockage de clinker	8
I.2.3.4. Broyage de clinker	9
I.2.3.5. Stockage, ensachage et expédition	10
I.2.4. Constitution du ciment.....	10
I.2.4.1. Le clinker	10
➤ Composition chimique du clinker	10
I.2.4.2. Gypse	11
I.2.5. Classification des ciments en fonction de leur composition	11
I.3. Ajouts de ciment	11
I.3.1. Définition	11
I.3.2. La pouzzolane	12
I.3.2.1. Définition	12
I.3.2.2. Types de pouzzolane	12
I.3.2.3. L'utilisation de la pouzzolane	12
Chapitre II: Méthodes et matériel.	
II.1. MATIERES ET METHODES.....	13
II.1.1. Matières Premières	13
II.1.1.1. Le clinker.....	13
II.1.1.2. La pouzzolane.....	14
II.1.1.3. Le gypse.....	15
II.1.2. Composition pondérale des différents ciments	15

II.1.3. Formulation des mortiers normalisés.....	16
II.1.3.1. L'eau de gâchage.....	16
II.1.3.2. le sable	16
II.2. Détermination des caractéristiques chimiques.....	16
II.2.1. Détermination de la perte au feu.....	16
II.2.2. Détermination de la silice	17
II.3. Mesures expérimentales	18
II.3.1. Détermination la teneur des oxydes.....	18
II.3.2. Détermination du refus pour les matières fines.....	19
II.3.3. Détermination de la Surface Spécifique de Blaine	20
II.3.4. Essais de prise.....	21
II.3.4.1. Détermination De la consistance Normale	22
II.3.4.2. Détermination du temps de prise	22
II.3.5. Préparation des mortiers	23
II.3.5.1. Préparation des éprouvettes	24
II.3.5.2. Conservation des moules et des éprouvettes.....	25
II.3.6. Essais sur éprouvettes de ciment durci	26

Chapitre III : Résultats et discussions

III.1. Résultats et analyses.....	27
III.1.1. Essais sur ciment anhydre	27
III.1.1.1. Influence du taux d'ajout pouzzolane sur les Teneurs en Oxydes	27
III.1.1.2. Influence du taux d'ajout pouzzolane Sur la Surface Spécifique du Ciment	28
III.1.1.3. Influence du taux d'ajout pouzzolane sur le refus.....	29
III.1.1.4. La Relation entre la surface spécifique et les analyses granulométriques.....	30
III.1.2. Essais sur ciment hydraté	31
III.1.2.1. Influence du taux de pouzzolane sur la consistance normale	31
III.1.2.2. Influence du Taux de pouzzolane sur le Temps de Prise	32
III.1.3. Essais sur mortiers.....	33
III.1.3.1. Influence du Taux de pouzzolane sur la résistance à la compression.....	33
III.1.3.2. Influence du taux de pouzzolane sur la résistance à la flexion.....	34
Conclusion Générale	36

Liste des figures

Fig. I.1: Organigramme de SCEG	4
Fig. I.2: Le processus de fabrication du ciment Portland.....	6
Fig. I.3: Extraction et préparation des matières premières.....	7
Fig. I.4: Broyeur.....	7
Fig.I.5: Zone de cuisson.....	9
Fig.I.6: Nodules de clinker.....	9
Fig. I.7: Différents ajouts cimentaires.....	11
Fig. II.1: Le clinker avant et après broyage	14
FigII.2: La pouzzolane naturelle de BENI-SAF avant broyage.....	15
Fig.II.3: Le sable normalisé.....	16
Fig II. 4 : Four a moufle.....	17
FigII. 5: Creuset sur un bec maker.....	18
Fig.II.6: Tamiseuse alpine.....	19
Fig. II.7: Perméabilimètre de Blaine.....	21
FigII. 8: Appareil à VICAT automatique.....	23
Fig.II.9: Sable normalisé, pesée d'eau et de ciment.....	24
Fig. II.10: Malaxeur.....	25
Fig. II.11: Table à choc.....	25
Fig. II.12: Aplanir les moules.....	25
Fig. II.13: conservation des moules.....	25
Fig. II.14: conservation des éprouvettes.....	25
Fig.II.15: Essais de flexion.....	26
Fig.II.16: Essais de compression.....	26
Fig. III.1: Variation de la teneur des oxydes en fonction du taux de pouzzolane.....	28
Fig.III.2: Variation de la surface spécifique de ciment en fonction de taux d'ajout pouzzolane.....	29
Fig.III.3 : Analyse granulométriques du ciment préparé (ALPINE).....	30
Fig.III.4 : Effet de surface spécifique sur l'analyse granulométriques de ciment (ALPINE).....	31
Fig. III.5: Variation du Rapport E/C (Consistance normale) en fonction du taux de pouzzolane.....	32
Fig. III.6 : Variation des Temps de prises en fonction de taux de pouzzolane.....	33
Fig.III.7: Variation de la résistance mécanique à la compression en fonction du taux de pouzzolane.....	34
Fig.III.8: Variation de flexion en fonction de taux de pouzzolane.....	35

Liste des tableaux

Tableau. I.1: Caractéristiques techniques.....	3
Tableau.I.2: Composition cru	5
Tableau. I.4: Composition chimique du clinker de ciment portland ordinaire.....	10
Tableau II.1: Principaux constituants du cru de clinker.....	13
Tableau II.2: La composition chimique du clinker.	13
Tableau II.3: Composition chimique élémentaire de la pouzzolane.	14
Tableau.II.4 : Composition pondérale des différents ciments.....	15
Tableau.II.5: Composition des mortiers.	20
Tableau III. 1: Analyses chimiques des ciments préparés (les oxydes).	27
Tableau III. 2. La Finesse de Blaine.....	28
Tableau.III.3: Refus.....	29
Tableau.III.4: Refus en fonction de la surface spécifique.....	30
Tableau.III.5 : La consistance.	31
Tableau.III.6 : Temps de prise.....	32
Tableau.III.7: Résistance à la compression.	33
Tableau.III.8: Résistance à la flexion.....	34

LISTE DES ABREVIATIONS

CEM : Ciment Portland.

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 : Silicate tricalcique ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$).

C2S : Silicate dicalcique ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$).

C3A : Aluminate tricalcique ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$).

C4AF : Aluminoferrite tétracalcique ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$).

CaO: Chaux.

C-S-H : Silicates de calcium hydratés.

C-A-H : Aluminates de calcium hydratés.

CH : Hydroxyde de calcium (portlandite) ($\text{Ca}(\text{OH})_2$).

CaSO₄: Gypse.

PAF: Perte au feu.

R: Résistance.

R_{cp} : Résistance à la compression.

C : masse de ciment.

E : masse d'eau.

E/C: Rapport massique eau sur ciment.

HR : Humidité relative.

R₁ ,R₂: broyeurs cru.

Résumé

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 cinq pourcentages de l'ajout [0%, 5%, 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, poids spécifique, finesse, consistance des pâtes de ciment, et temps de prise), ainsi que les caractéristiques des mortiers préparés par ces ciments, telles que, le comportement mécanique (résistances mécaniques à la compression et à la flexion.

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.

Les mots clés : ciment, pouzzolane, clinker.

يدرس هذا العمل التجريبي مزايا وإمكانية الاستبدال الجزئي للكلنكر بإضافة البوزولان في ا
تتألف الدراسة من تحضير الأسمنت باستخدام البوزولان عن طريق استبدال نسبة معينة من الـ

[30 20 10 5 0]

دراسة خصائص الاسمنت والسلوك الميكانيكي للهاو .

الكلمات المفتاحية:

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 mécanique des matériaux cimentaires (mortier). D'autre part leurs 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).

L'objectif de notre étude est d'évaluer expérimentalement l'influence du taux d'ajout de pouzzolane (0%, 5%, 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, ce chapitre est consacré à la présentation de l'Enterprise(SC, SEG), le processus de fabrication du ciment.

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 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 propose les points sur les résultats obtenus à l'aide des résultats issus des expériences au laboratoire.

Chapitre I: Synthèse bibliographique.

I.1. Présentation du l'entreprise

I.1.1. Historique

L'usine de Sour-El-Ghozlane est une cimenterie qui utilise la voie sèche. La réalisation de cette usine a été confiée à une société danoise F-L Smith avec laquelle la S.N.M.C a signé le contrat le 26 novembre 1979 avec des délais de réalisation de 38 mois, Le début des travaux a été fixé le 26 février 1980. La première production de ciment s'est réalisée le 20 octobre 1983 et le 26 février fut la date de la réception définitive de la cimenterie.

I.1.2. Implantation géographique

La cimenterie de Sour-El-Ghozlane est située à 120 Km au sud d'Alger, et 27 Km de Bouira, chef-lieu de la wilaya. La société occupe une position géographique stratégique, En effet, implantée aux limites du tell et des hauts plateaux, cette position lui permet de jouer un rôle économique important dans la région du centre du pays. Elle assure ainsi la satisfaction des besoins en ciment de plusieurs wilayas, Au nord : Médéa, Tizi-Ouzou, Bejaia Au centre : Djelfa, Laghouat. Au sud Ghardaïa, Illizi, Ouargla.

I.1.3. Description de l'usine

La société des ciments de S.E.G Sour el Ghozlane est de type par action, elle est une filiale du groupe des ciments et dérivés du centre "ERCC".

- Constructeur : F.L smithien, Danemark.
- Qualité du Ciment : CPJ CEMII /A 42.5MPa.
- Production annuelle : 1.000.000 tonnes.
- Superficie totale : 41 Hectares.
- Superficie occupé : 11 Hectares.
- L'investissement est de =1.354 Milliards de Dinars.
- L'effectif employé se répartie comme suit (selon la synthèse de fin mars 2008) :
- Cadres supérieures =110.
- Maitrise=298.
- Exécution=189.
- Totale=590

Tableau. I.1: *Caractéristiques techniques.*

Désignation	Capacité
Concasseur calcaire argile	1000 T/H
Broyeurs cru	2 × 140 T/H
Four rotatif	3000 T/jour
Broyeurs clinker	2 × 100 T/H
Ensacheuses rotatives	5 × 100 T/H
Silo à clinker	3x15000 t
Concasseur des ajouts	100 t/h
Stock de gypse	2000 t
Silos ciment	4x8000 t
Chargement du ciment en vrac	2x200 t/h
Atelier d'ensachage	5x100 t/h

I.1.4. Les grands projets réalisés avec les produits de la cimenterie

Les grands projets réalisés par cette cimenterie sont:

- Les projets de la société COSIDERCONSTRUCTION
- Ouvrages d'art du projet autoroute Est-ouest
- Le grand barrage de TILES DIT
- Le projet de la cimenterie –Msila

I.1.5. Organigramme de la filiale

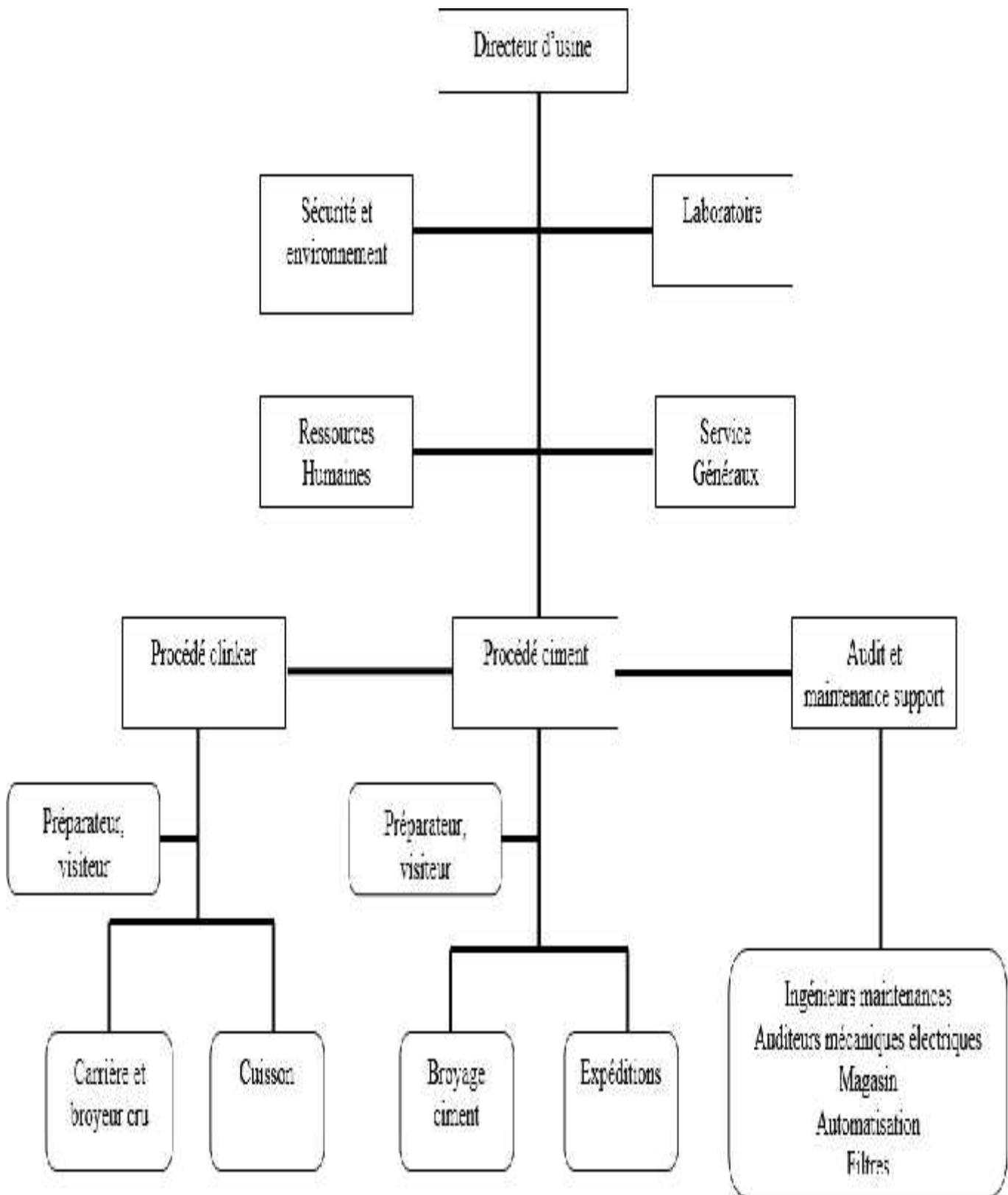


Figure. I.1: *Organigramme de SCEG.*

I.2. Le ciment

I.2.1. Définition du ciment

Le ciment est un liant hydraulique, matériau inorganique finement broyé, lorsqu'il est mélangé avec de l'eau, il forme une pâte qui fait prise, durcit et conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau. Le ciment ordinaire anhydre est constitué de clinker portland, de gypse et éventuellement d'additifs tels que les cendres volantes, le laitier granulé de haut fourneau, la fumée de silice, pouzzolanes naturelles ... [1].

I.2.2. Matières premières

Les ciments usuels sont fabriqués à partir d'un mélange d'environ de 80 % de calcaire (CaCO_3) et de 20 % d'argile ($\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$). Selon l'origine des matières premières, ce mélange peut être corrigé par oxyde de fer ou autres matériaux fournissant le complément d'alumine et de silice requis, les matières premières utilisées pour fabriquer le ciment sont composées essentiellement de chaux (CaO) de silice (SiO_2), d'alumine (Al_2O_3) et d'oxyde de fer (Fe_2O_3), la chaux est apportée généralement par les roches carbonatées qui représentent 80 % du cru d'alimentation (Tableau I.2). L'alumine, la silice et l'oxyde de fer sont apportés par des formants approximativement 20 % du cru d'alimentation [2].

Tableau.I.2: *Composition cru.*

Matière première	Formule chimique	Abréviation	Proportion	Source de matière première
chaux	CaO	C	77 à 80%	Argile, calcaires
Silice	SiO_2	S	10 à 15%	Argile, calcaires, basalte, silicate Calcium, sable
Alumine	Al_2O_3	A	5 à 10%	Argile, minerai d'aluminium
Oxyde de fer	Fe_2O_3	F	2 à 3%	Argile, minerai de fer

I.2.3. Processus de fabrication du ciment

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

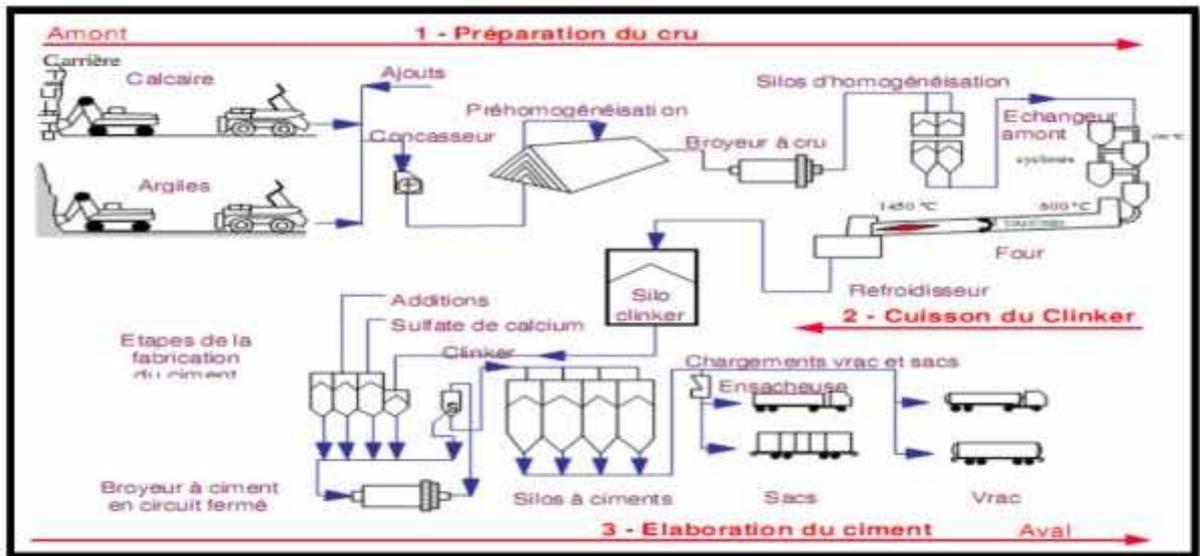


Figure. I.2: *Le processus de fabrication du ciment Portland.*

Le procédé de fabrication du ciment consiste à broyer un mélange de matières premières (calcaire + argile) puis à les faire cuire dans un grand four rotatif à une température atteignant environ 1450°C [3]. De la carrière aux silos de stockage du ciment, la matière passe par cinq étapes principales :

- Extraction des matières premières.
- Stockage et broyage des matières premières.
- Cuisson pour obtention du clinker.
- Broyage du clinker et d'additifs pour obtenir le ciment.
- Conditionnement et expédition.

I.2.3.1. Extraction et préparation des matières premières

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

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



Figure. I.3: *Extraction et préparation des matières premières.*

I.2.3.2. Le séchage et le broyage

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 [4].

Le mélange du calcaire, d'argile de sable et de minerai de fer est dosé pour alimenter les deux broyeurs cru R1 et R2, le produit résultant du broyage est appelé farine crue, elle est stockée dans deux silos d'homogénéisation de 8000 tonnes chacun.

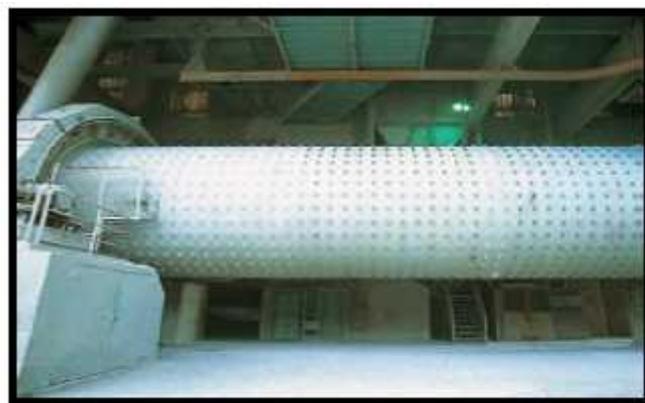


Figure. I.4: *Broyeur.*

I.2.3.3. Cuisson de la farine et stockage de clinker

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

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

Les phénomènes physico-chimiques à la cour de la cuisson sont comme suit :

- A 100 °C : évaporation de l'eau mécanique ou eau libre.
- Entre 450 et 550 °C : Evaporation de l'eau de constitution (chimique) ou cristalline.
- A partir de 650 °C : Formation des aluminates et ferrites de calcium.



- A partir de 700 °C : Décomposition du calcaire $\text{CaCO}_3 \longrightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2 \dots(3)$

- Vers 800 °C : Formation du silicate bicalcique (2CaO, SiO₂)



- A partir de 1250 °C: le silicate tricalcique appelé ‘Alite’ commence à apparaître à partir de la chaux et de la Bélite.



- Entre 1260 et 1450 °C : apparition du premier liquide .
- T = 1450 °C:Clinkérisation .



Figure.I.5: *Zone de cuisson.*

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).

I.2.3.4. 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. I.6). 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.6: *Nodules de clinker [5].*

Les modes de broyage utilisés en cimenterie sont adaptés au caractère dur, fragile et abrasif du clinker [5, 6].

I.2.3.5. Stockage, ensachage et expédition

Il existe quatre silos pour le stockage du ciment l'extraction du ciment des silos se fait à l'aide d'un système de variateur, le ciment est amène par des transporteurs à vis soit à l'atelier d'ensachage (pour la vente en sac), soit à l'atelier de livraison de camions citernes (pour la vente en vrac).

I.2.4. Constitution du ciment

Les ciments sont constitués, par mélange et broyage. Ils se composent de:

I.2.4.1. Le clinker

Produit obtenue par mélange de matières premières naturelles de composition chimique adéquate. La préparation du cru consiste à mélanger de manière homogène du calcaire (80%) et des minéraux riches en silice et alumine (20%):l'argile ou le kaolin. Le cru est ensuite calciné à 1450°C pour former le clinker. Les granules de clinker, d'un diamètre compris entre 5 et 40 mm, sont finement broyées avec Addition de gypse ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ de 3 à 5 % en masse) dont le rôle est de réguler la prise [7].

➤ Composition chimique du clinker

Le clinker est constitué principalement de quatre phases minérales issues de la combinaison chimique de la chaux (CaO) avec la silice (SiO_2), l'alumine (Al_2O_3) et l'oxyde de fer(Fe_2O_3).La composition chimique moyenne du clinker est présentée dans le tableau suivant:

Tableau. I.4: *Composition chimique du clinker de ciment portland ordinaire [8].*

Composant du clinker	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O
Notation cimentière	S	A	F	C	M	S	K	N
% (en masse)	19-25	2-9	1-5	62-67	0-3	1-3	0.6	0.6

I.2.4.2. Gypse

Pour produire du ciment, le clinker est très finement co-broyé avec du gypse ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) (retardateur de prise).

I.2.5. 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. Ils sont notés CEM et numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans leur notation européenne (la notation française est indiquée entre parenthèse) [9].

- 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).

I.3. Ajouts de ciment

I.3.1. Définition

Les ajouts sont des matières premières naturelles, artificielles, sous-produits d'une autre industrie, résidus industriels ou déchets industriels polluants, ils sont ajoutés soit au mélange de matières premières avant le broyage, soit à la farine crue, soit au clinker portland avant ou après le broyage, leurs pourcentages dans la masse varient suivant le but de l'addition et le rôle qu'elle peut jouer, ainsi on trouve des ajouts en faibles teneurs, moyennes ou en fortes teneurs. On distingue deux types d'ajouts: inertes et actifs [10].



Figure. I.7: Différents ajouts cimentaires.

I.3.2. La pouzzolane

I.3.2.1. Définition

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), Leur couleur est généralement noire ou rouge selon le degré d'oxydation du fer. Elles n'ont pas des propriétés hydrauliques intrinsèques mais, en présence d'eau avec de l'hydroxyde de chaux libéré par le clinker au cours de son hydratation, elles forment, elles aussi des hydrates stables et peu solubles dans l'eau. Les constituants qui, par le même processus que les pouzzolanes, conduisent également à la formation d'hydrates stables sont réputés avoir des propriétés pouzzolanique [11]. Les pouzzolanes naturelles sont essentiellement composées de silice réactive (dans des proportions supérieures à 25 %), d'alumine et d'oxyde de fer [12].

I.3.2.2. Types de pouzzolane

- **Pouzzolane naturelle:** La Pouzzolane naturelle est un produit d'origine volcanique ou composé essentiellement de silice alumine et fer.
- **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[13].

I.3.2.3. L'utilisation de la pouzzolane

La pouzzolane est utilisée essentiellement

- 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 .
- Elle possède des propriétés intéressantes pour l'isolation thermique et phonique [14].

Chapitre II: Méthodes et matériel.

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 le but de mettre en évidence l'influence de la pouzzolane sur les propriétés des mortiers confectionnés à base de ciment Portland artificiel (C.P.A) des essais physiques, chimiques et mécaniques ont été effectués au sein des laboratoires suivants :

- Laboratoire chimique de la cimenterie de SOUR EL GHOZLANE.
- Laboratoire physique de la cimenterie de SOUR EL GHOZLANE.
- Les matériaux utilisés proviennent de la cimenterie de SOUR EL GHOZLANE et La pouzzolane provient de BENI-SAF.

Nous avons effectué une série d'essais physiques, et mécaniques sur les matériaux étudiés et sur les mortiers. Ces essais étaient effectués dans le laboratoire de contrôle qualité 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.1. MATIERES ET METHODES

II.1.1. Matières Premières

Les Principaux composants des ciments élaborés sont :

- Clinker.
- Pouzzolane.
- Gypse.

II.1.1.1. Le clinker

Le clinker utilisé au cours de cette étude provient de la cimenterie de SOUR EL GHOZLANE. Il a été obtenu après cuisson d'un mélange contenant 80 % de calcaire et 20 % d'argile.

Les matières premières utilisées pour la fabrication du clinker de la cimenterie de SOUR EL GHOZLANE et les caractéristiques physiques sont indiquées dans le Tableau (II-2).

Tableau II.1: *Principaux constituants du cru de clinker.*

Clinker	Clinker de SOUR EL GHOZLANE
Ingrédient du clinker	Calcaire
	Argile
	Sable de dune (Bousâada)
	Minerai de fer

Tableau II.2: *La composition chimique du clinker.*

Elément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	SO ₃
(%)	22.22	4.87	3.90	1.84	64,94	0.26

**Figure. II.1:** *Le clinker avant et après broyage .*

II.1.1.2. 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.2: *La pouzzolane naturelle de BENI-SAF avant broyage.*

➤ **Analyses Chimiques de Pouzzolane Bani-saf (Spectromètre à rayons X).**

Tableau II.3: *Composition chimique élémentaire de la pouzzolane.*

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

II.1.1.3. Le gypse

Le dosage du gypse naturel (sulfate de calcium déshydraté, CaSO₄. 2H₂O) a été maintenu constant à 5% .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.

Le rôle principal de gypse :

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

II.1.2. 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 :

Tableau.II.4 : *Composition pondérale des différents ciments.*

pouzzolane(%)	0	5	10	20	30
Clinker (%)	95	90	85	75	65
Gypse (%)	5	5	5	5	5

II.1.3. Formulation des mortiers normalisés

Le mortier est constitué par le mélange suivant :

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

II.1.3.1. L'eau de gâchage

L'eau utilisée est l'eau potable du robinet. Cette eau ne contenant pas d'impuretés nuisibles aux mélanges.

II.1.3.2. le sable

Dans cette étude expérimentale, on a 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 arrondie. 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 1350 g.



Figure.II.3: *Le sable normalisé.*

II.2. Détermination des caractéristiques chimiques

II.2.1. Détermination de la perte au feu

- Matériels utilisés
 - Creuset en platine.

- Balance de précision.
- Four a moufle.
- **Mode opératoire**
 - Assurer que les conditions et les matériaux de travail sont adéquats.

Peser ($1,00 \pm 0,05$) g de l'échantillon (m_1) dans un creuset qui a été préalablement calciné et taré. Placer le creuset couvert dans le four électrique régler à (950 ± 25) °C. Après 5 min de chauffage, retirer le couvercle et laisser le creuset dans le four pendant 10 min supplémentaires. Laisser refroidir le creuset à température ambiante dans le dessiccateur.



Figure. II. 4 : *Four a moufle.*

On calcule la perte au feu L observée, en pourcentage, par la formule:

$$L = \frac{(m_1 - m_2)}{m_1} * 100 \quad (1)$$

m_1 : la masse de la prise d'essai initiale, en grammes.

m_2 : la masse de la prise d'essai calcinée, en grammes.

II.2.2. Détermination de la silice

- **Matériels utilisés**

- Creuset en platine.
- Bec maker.
- Four à moufle.

- **Mode opératoire**

Placer le filtre et son contenu dans un creuset en platine préalablement séché, calciné et taré

soit P_1 . Faire le creuset sur le bec maker, introduire le creuset dans le four à 1000°C pendant 30 min jusqu'à une masse constante P_2 .



Figure.II. 5 : Creuset sur un bec maker.

- **Méthode de calcul**

$$S_z = \frac{P_2 - P_1}{P} * 100 \quad (2)$$

P_2 : Poids du creuset.

P_1 : Poids total du creuset après calcination.

P : Prise d'essai.

II.3. Mesures expérimentales

II.3.1. Détermination la teneur des oxydes

Le bombardement de la matière par des rayons X provoque l'émission de raies caractéristiques de spectre dont leurs intensités sont mesurées. L'échantillon à analyse doit être réduit en poudre par broyage afin d'atténuer l'influence des effets liés à la minéralogie, à la granulométrie et aux interactions possibles entre les éléments.

Appareillage

- Broyeur à disques.
- CubiX XRF (Spectromètre à rayons X).
- Micro-ordinateurs.
- Logiciels (Blend Xpert et SuperQ).
- Pastilleuse.

- Pastille de 37 mm de diamètre.

Méthode de mesure

- Broyer 20 grammes de l'échantillon farine dans un broyeur à disques pendant 6 min pour clinker et 4 min pour gypse et la pouzzolane en présence de quelques gouttes de T.E.A.
- Récupérer l'échantillon broyé, en peser 7 grammes et les presser par une pastilleuse.
- Mettre la pastille de l'échantillon dans le spectromètre à rayons X pour l'analyser
- Ouvrir la fenêtre de mesures analyse dans le logiciel SuperQ et démarrer l'analyse par le logiciel Blend Xpert.

Les résultats de l'analyse de l'échantillon sont calculés par le CubiX XRF et affichés dans le micro-ordinateur.

II.3.2. Détermination du refus pour les matières fines

Pour le ciment le refus est déterminé sur des tamis de 45 μm



Figure.II.6: *Tamiseuse alpine.*

• Matériels utilisés

- Balance de précision.
- Tamis d'essai.
- Tamiseur (Alpine).

- **Mode opératoire**

- Vérifier le bon fonctionnement de l'alpine.
- Prélever m= 20 grammes de matière directement de l'échantillon bien homogène.
- Tamiser sur tamis 45 μ m pendant 5 minutes à 2500 pascal.
- Démarrer le tamisage.
- A la fin du tamisage, récupérer le refus et peser la masse récupérée.

Calcul et expression des résultats

Soit P la masse résiduelle , Refus () =P*5 (3)

II.3.3. Détermination de la Surface Spécifique de Blaine

- **Matériels utilisés**

- Cellule de perméabilité.
- Disque perforé.
- Piston plongeur.
- Balance de précision.
- Manomètre.
- Chronomètre.
- Papier filtre.
- Entonnoir.

- **Réactifs**

- Graisse légère.
- Liquide manométrique.

- **Mode opératoire**

- Peser dans une balance de précision le poids du ciment déterminé.
- Former le lit de ciment comme suit :
- Mettre le disque perforé dans la cellule de perméabilité en s'assurant qu'il soit plat.
- Poser un papier filtre dessus.
- Introduire la quantité du ciment à l'intérieur de la cellule en se servant d'un

entonnoir.

- Aplatir la quantité par un papier filtre et en pressant par un piston plongeur.
- Mettre la cellule dans le manomètre, remonter le liquide par la poire d'aspiration puis fermer le manomètre et démarrer le chronomètre une fois le premier repère atteint, laisser écouler le liquide jusqu'au 2^{ème} repère puis arrêter le chronomètre.

• **Calcule et expression des résultats :**

$$SSB = K \frac{\sqrt{e^3} \cdot \sqrt{t}}{\rho(1-e)\sqrt{\mu}} \quad (4)$$

SSB : Surface spécifique de Blaine (cm²/g).

K : Constante de l'appareil.

t : Temps mesuré en secondes (s).

e : La porosité de la couche tassée (%).

ρ : La masse volumique absolue de la matière (g/cm³).

μ : La viscosité de l'air. μ = 0.0001798 (en poises) .

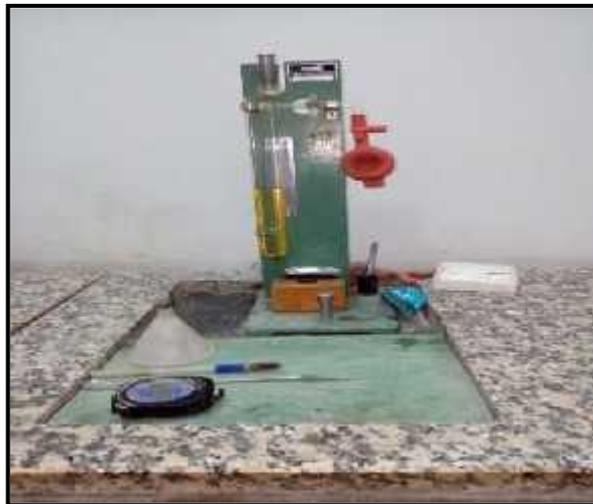


Figure. II.7: *Perméabilimètre de Blaine.*

II.3.4. Essais de prise

- **Appareillage**
 - Appareil à VICAT.

- **Composition de la pâte**

La quantité du ciment qui doit être pesé est 500g + 125 ml d'eau doit être mélangé dans le malaxeur, la durée de cette opération est de 150 secondes.

II.3.4.1. Détermination De la consistance Normale

La consistance normalisée de la pâte de ciment est déterminée à l'aide de l'appareil de Vicat .

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

- placer la pâte au dessus de la sonde et régler cette dernière jusqu'au zéro.
- Abaisser ensuite la sonde jusqu'au contact de la pâte et lâcher rapidement les parties mobiles jusqu'à pénétration de la sonde verticalement au centre de la pâte.
- Noter la norme indiquée sur la graduation. Si la sonde pénètre d'une valeur de 05+02 c.à.d. que la quantité d'eau est exacte sinon l'essai est à refaire.

II.3.4.2. Détermination du temps de prise

Le temps de prise est déterminé à l'aide de l'appareil de Vicat Automatique muni d'une aiguille , à la température de $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$.

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 début de prise : est l'intervalle de temps qui s'écoule entre l'instant où le liant hydraulique a été mis en contact avec l'eau de gâchage et celui où l'aiguille de Vicat ne pénètre plus au fond du moule conique. Faut-il noter que le début de prise est Normalisé.
- La fin de prise : C'est le moment où la pâte pure supporte le poids de l'aiguille de Vicat sans que celle-ci ne laisse pas trace visible.

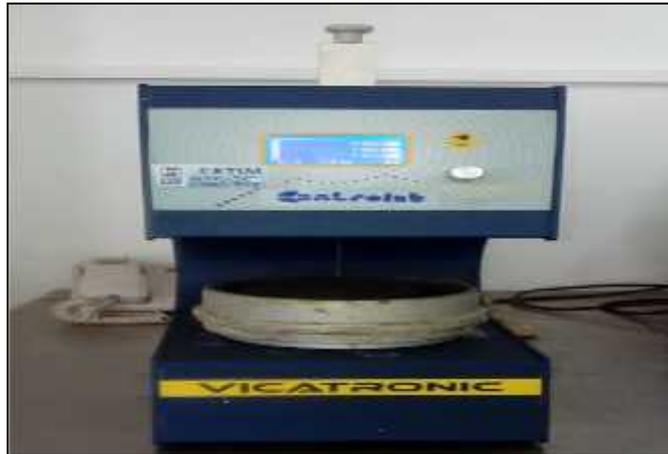


Figure.II. 8: Appareil à VICAT automatique.

II.3.5. Préparation des mortiers

La composition du mortier à tester est la suivante :

- Sable normalisé : 1350 ± 5 g.
- Ciment : 450 ± 2 g.
- Eau de gâchage : 225 ± 1 g.

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.

Tableau.II.5: *Composition des mortiers.*

Type de ciment	Composition des mortiers		
	Ciment (g)	L'eau (ml)	Sable normalisé (g)
CEM01 0%	450	225	1350
CEM02 5%	450	225	1350
CEM03 10%	450	225	1350
CEM04 20%	450	225	1350
CEM05 30%	450	225	1350

**Figure.II.9:** *Sable normalisé, pesée d'eau et de ciment.*

II.3.5.1. Préparation des éprouvettes

- Les éprouvettes doivent être de forme de 4×4×16cm.
- 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.
 - Etiqueter les moules pour identification.



Figure. II.10: Malaxeur. **Figure. II.11:** Table à choc. **Figure. II.12:** Aplanir les moules.

II.3.5.2. Conservation des moules et des éprouvettes

- Placer sans tarder, les moules dans un 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.13: conservation des moules.



Figure. II.14: conservation des éprouvettes.

II.3.6. Essais sur éprouvettes de ciment durci

L'essai a pour but de déterminer la résistance mécanique à la flexion et compression aux âges 02 j, 07j, 28j.



Figure.II.15: *Essais de flexion.*



Figure .II.16: *Essais de compression.*

Chapitre III : Résultats et discussions

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.

III.1. Résultats et analyses**III.1.1. Essais sur ciment anhydre****III.1.1.1. Influence du taux d'ajout pouzzolane sur les Teneurs en Oxydes**

Le Tableau (III. 1) et la Fig. (III.1) représentent la variation des taux des principaux oxydes ainsi que la perte au feu dans le ciment en fonction du taux de la pouzzolane.

Tableau III. 1: *Analyses chimiques des ciments préparés (les oxydes).*

Pouz (%)	SampleName	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	CaO	MgO	PAF
0	CEM- CPA	20,85	5,08	3,40	62,34	1,86	1,78
5	CEM- CPA 1	21,74	5,00	3,43	58,08	1,80	1,50
10	CEM- CPA 2	24,81	5,75	4,7	56,53	2,00	2,18
20	CEM -CPA 3	27,08	6,78	5,58	51,18	2,46	2,87
30	CEM -CPA 3	27,98	6,94	5,83	50,06	2,50	3,19

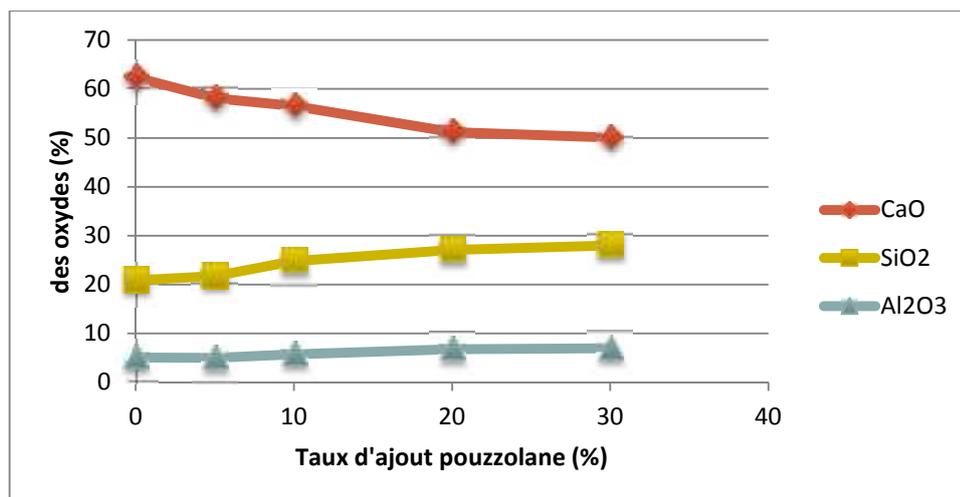


Figure. III.1: *Variation de la teneur des oxydes en fonction du taux de pouzzolane.*

- On remarque que L'incorporation de la pouzzolane dans le clinker à différents pourcentages : (0% ,5% ,10% ,20% ,30%), augmente le pourcentage des oxydes (SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , Fe_2O_3) et diminue le taux d'oxyde (CaO) car elle est essentiellement composée de silice réactive, d'alumine et d'oxyde de fer.

III.1.1.2. Influence du taux d'ajout pouzzolane Sur la Surface Spécifique du Ciment

Les résultats du (Tableau III.2) et la (Fig. III.2) présentent l'effet d'addition de la pouzzolane sur la surface spécifique du ciment.

Tableau III. 2: *La Finesse de Blaine.*

	Pouzzolane (%)	SSB (cm^2/g)
CEM 1	CPA 0%	3534
CEM 2	5% Pouzzolane	3850
CEM 3	10% Pouzzolane	4045
CEM 4	20% Pouzzolane	4210
CEM 5	30% Pouzzolane	4438

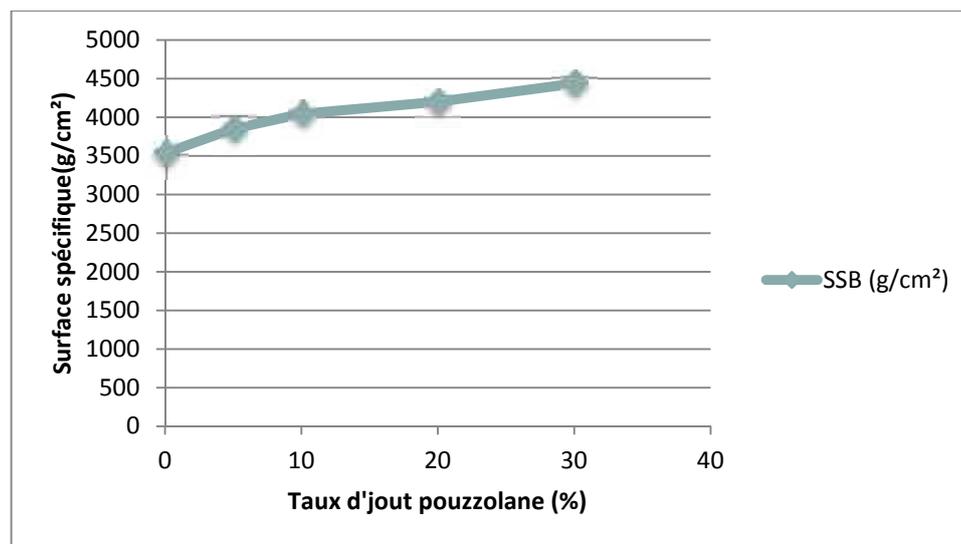


Figure.III.2: *Variation de la surface spécifique de ciment en fonction de taux d'ajout pouzzolane.*

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 4045 et 4438 cm^2/g donc elle est élevée par rapport au ciment témoin.

Selon les résultats obtenus, donc on conclut que l'augmentation de la quantité de l'ajout de pouzzolane incorporée dans le ciment à un effet significatif sur la surface spécifique (Blaine) de ciment.

III.1.1.3. 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)

Tableau.III.3: *Refus.*

	Pouzzolane (%)	Refus 45 μm
CEM 1	CPA 0%	12,2
CEM 2	5% Pouzzolane	11,4
CEM 3	10% Pouzzolane	9,1
CEM 4	20% Pouzzolane	8,5
CEM 5	30% Pouzzolane	8,1

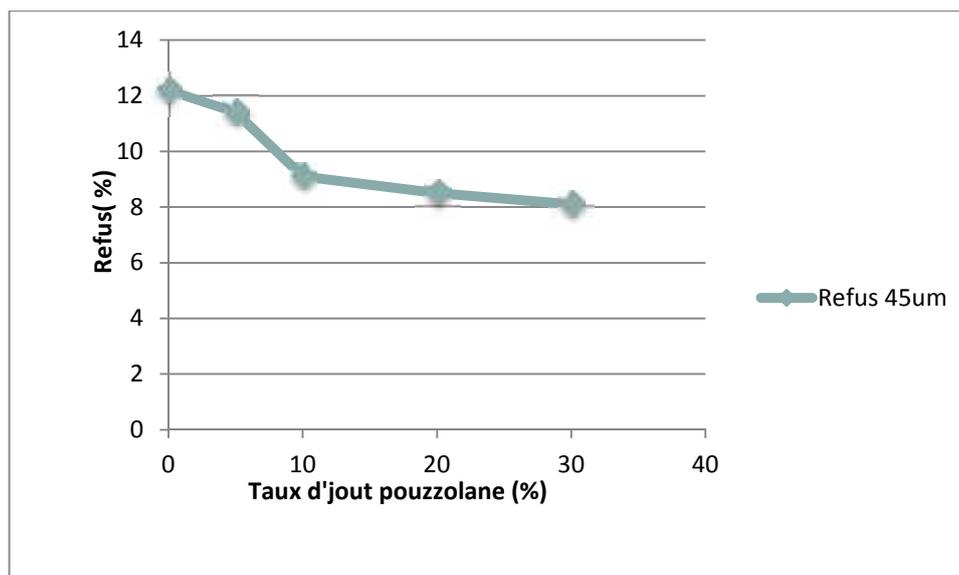


Figure.III.3 : *Analyse granulométrique du ciment préparé (ALPINE).*

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

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

III.1.1.4. La Relation entre la surface spécifique et les analyses granulométriques

Les résultats expérimentaux obtenus du tableau (III.4) et la figure (III.4) présentent La Relation entre la surface spécifique et les analyses granulométriques.

Tableau.III.4: *Refus en fonction de la surface spécifique.*

	Pouzzolane (%)	Refus 45µm	SSB (cm ² /g)
CEM 1	CPA 0%	12,2	3534
CEM 2	5% Pouzzolane	11,4	3850
CEM 3	10% Pouzzolane	9,1	4045
CEM 4	20% Pouzzolane	8,5	4200
CEM 5	30% Pouzzolane	8,1	4438

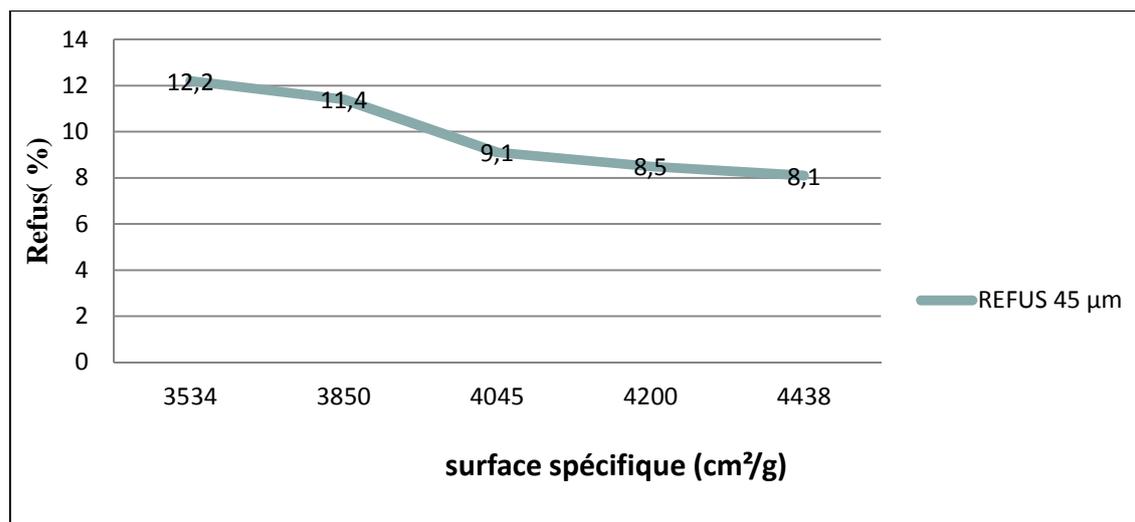


Figure.III.4 : *Effet de surface spécifique sur l'analyse granulométriques de ciment (ALPINE).*

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.1.2. Essais sur ciment hydraté

III.1.2.1. Influence du taux de pouzzolane sur la consistance normale

Les résultats du tableau (III.5) et la figure (III.5) présentent l'effet de l'addition de la pouzzolane sur la consistance normale.

Tableau.III.5 : *La consistance.*

	Pouzzolane (%)	E/C (%)
CEM 1	CPA 0%	26,5
CEM 2	5% Pouzzolane	26,6
CEM 3	10% Pouzzolane	27.5
CEM 4	20% Pouzzolane	28
CEM 5	30% Pouzzolane	28.5

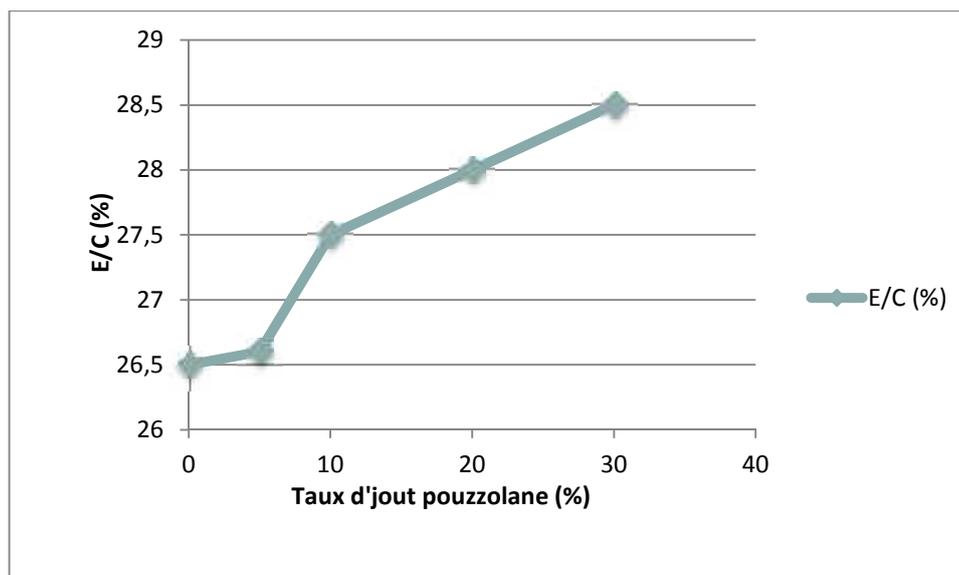


Figure. III.5: *Variation du Rapport E/C (Consistance normale) en fonction du taux de pouzzolane.*

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.

III.1.2.2. Influence du Taux de pouzzolane sur le Temps de Prise

Les résultats du tableau (III.6) et la figure (III.6) présentent l'évolution de ces temps mesurés en minutes (début et fin de prise) pour les différentes compositions des mélanges.

Tableau.III.6 : *Temps de prise.*

	Pouzzolane (%)	DP (min)	FP (min)
CEM 1	CPA 0%	140	200
CEM 2	5% Pouzzolane	157	225
CEM 3	10% Pouzzolane	164	233
CEM 4	20% Pouzzolane	167	236
CEM 5	30% Pouzzolane	170	240

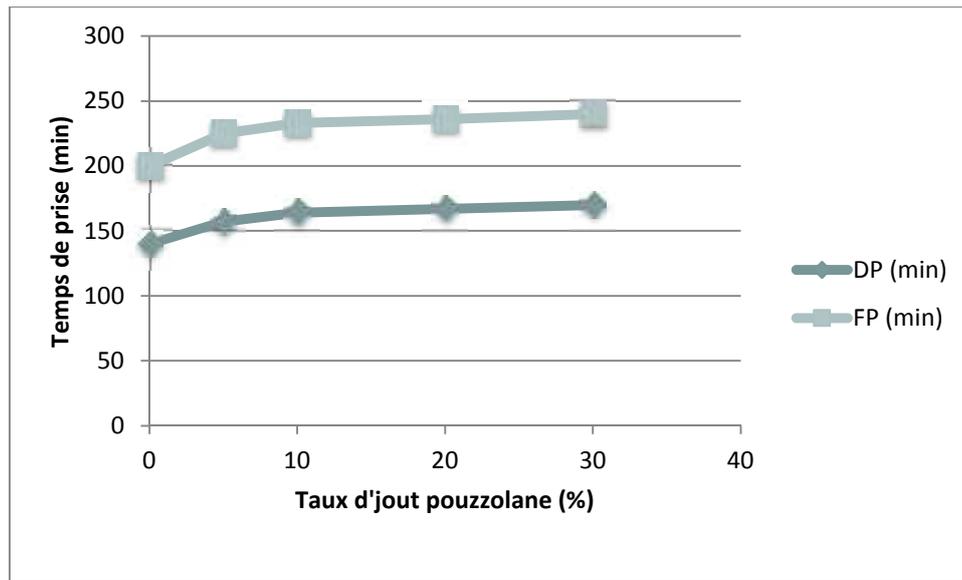


Figure. III.6 : *Variation des Temps de prises en fonction de taux de pouzzolane.*

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 et la fin de prise nous remarquons que les pâtes à base de 5% ,10%, 20% et 30 % de pouzzolane présente une augmentation respectivement par rapport aux pâtes de contrôle.

III.1.3. Essais sur mortiers

III.1.3.1. Influence du Taux de pouzzolane sur la résistance à la compression

Les résultats expérimentaux du tableau (III.7) et la figure (III.7) présentent l'effet du taux de pouzzolane sur la résistance à la compression.

Tableau.III.7: *Résistance à la compression.*

	Pouzzolane(%)	Rc02j(MPa)	Rc07j (MPa)	Rc28j (MPa)
CEM 1	CPA 0%	27.40	44.20	58.70
CEM 2	5% Pouzzolane	26.90	42.00	55.94
CEM 3	10% Pouzzolane	22.30	38.80	47,80
CEM 4	20% Pouzzolane	21.10	38.40	44,00
CEM 5	30% Pouzzolane	20.10	37.90	43,20

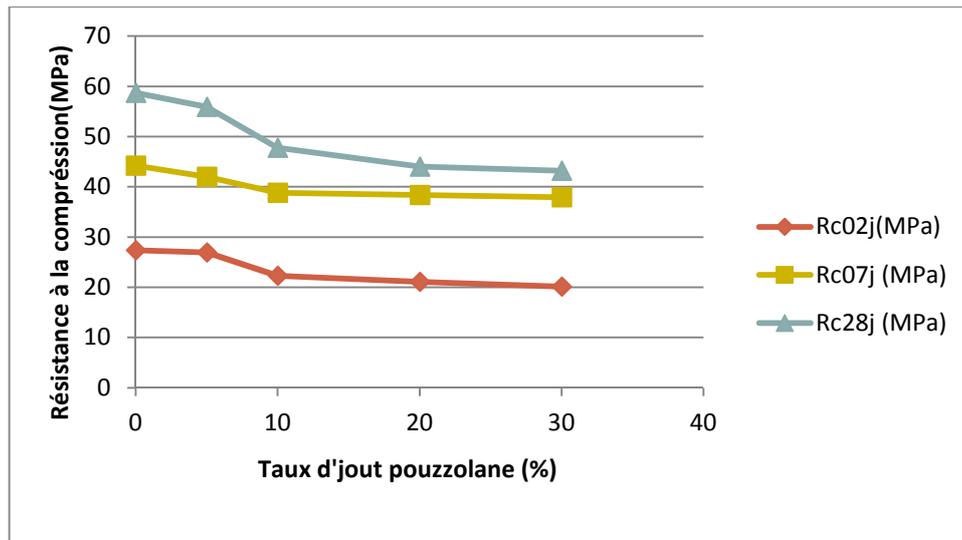


Figure.III.7: *Variation de la résistance mécanique à la compression en fonction du taux de pouzzolane.*

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.

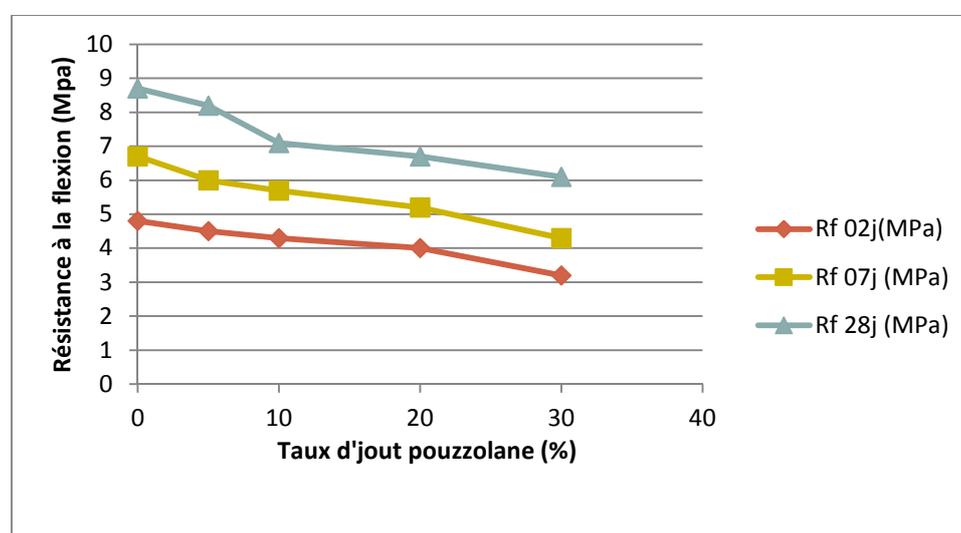
Cette diminution de la résistance est attribuée principalement à l'activité lente de la pouzzolane. Ce phénomène s'explique par l'interaction entre la silice réactive qui se situe dans la partie vitreuse de la pouzzolane et le Ca(OH)_2 libéré par l'hydratation du CPA ce qui donne à la pouzzolane la propriété 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.1.3.2. Influence du taux de pouzzolane sur la résistance à la flexion

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

Tableau.III.8: *Résistance à la flexion.*

	Pouzzolane(%)	Rf 02j(MPa)	Rf 07j (MPa)	Rf 28j (MPa)
CEM 1	CPA 0%	4,8	6,7	8,7
CEM 2	5% Pouzzolane	4.5	6.0	8.2
CEM 3	10% Pouzzolane	4,3	5,7	7,1
CEM 4	20% Pouzzolane	4	5,2	6,7
CEM 5	30% Pouzzolane	3,2	4,3	6,1

**Figure.III.8:** *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 . 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.

Conclusion Général

Conclusion Général

Ce travail est une recherche sur l'étude de l'influence du taux d'ajout de 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'introduction de la pouzzolane conduit au développement des résistances mécaniques faibles aux jeunes âges.
- 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'utilisation de la pouzzolane dans le ciment entraîne une augmentation de la surface spécifique Blaine.

Enfin pour assurer une bonne qualité des ciments avec caractéristiques physicochimiques et mécaniques conformes à la norme et aussi réduire le maximum la quantité du clinker utilisée : le taux de gypse 5% et pouzzolane à 20%.

Références bibliographiques

- [1]: J. P Olivier : livre de " Durabilité des bétons ". (A.NONAT :chapitre2; V. BAROGHELBOUNY, B. CAPRA, S. LAURENS: chapitre9; A. CARLES-GIBERGUES, H.HORNAIN :chapitre11; G. ESCADEILLAS, H. HORNAIN: chapitre 12 (Edition: Presse de l'école nationale des ponts et chaussées-2008).
- [2]: M.Venuat ;La pratique des ciments, mortiers et bétons ;Tome 1 : « Caractéristiques des liants et des bétons, mise en œuvre des coulis et mortiers ; édition2 ;Collection Moniteur.
- [3]: N. Adam ; Propriétés des Bétons. ;édition Eyrolles, Translated by CRIB ; 2000.
- [4]: www.controls-group.com/...php/url...62.../nomefile=6265_francia.
- [5]: H. Rumpf, Aufber. Techn., 1973. 2: p. 59-71.
- [6]: A. A. Griffith, The Phenomena of Rupture and Flow in Solids. Phil. Trans. Roy. Soc, 1921. 163-198.
- [7]: A, Govin,"Aspects Physico -Chimique de l'interaction bois-ciment modification de L'hydratation du ciment par le bois" thèse de Doctorat de l'université de Limoges ,2004.
- [8]: H.F.W. Taylor, "Cement chemistry", 2nd edition, University of Aberdeen, 2007.
- [9]: 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).
- [10]: Georges Dreux, Jean Festa, Nouveau guide du béton et de ses constituants, Paris, Edition Eyrolles, 2009.
- [11]: G .Dreux & J. Festa ;Nouveau guide du béton et de ses constituants ; 8^{ème} Edition.Eyrolles; Mai 1998.
- [12]: R. Dupain, R. Lanchon & J.C. Saint -Arroman ;Granulats, sols, ciments et Bétons: Caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire ; EditioCasteilla. 1995.
- [13]: A.MEBROUKI «influence de la pouzzolane de Beni-Saf sur les caractéristiques mécaniques des mortiers » thèse de Magister- Université Mostaganem - juin 2003.
- [14]: Publication Internet « mailto:philippe.montel@auvergne_volcan.com » 2004.